



DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DEL
MEDIO AMBIENTE
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y
AMBIENTALES
UNIVERSIDAD DE CÁDIZ

ÁREA TECNOLOGÍAS DEL AGUA
FUNDACIÓN CENTRO DE LAS NUEVAS
TECNOLOGÍAS DEL AGUA

INFLUENCIA DEL TIPO Y GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA DEPURACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES POR EL SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO VERTICAL Y HORIZONTAL

TESIS DOCTORAL

Juan Ramón Pidre Bocardo

Cádiz, Octubre de 2010

INFLUENCIA DEL TIPO Y GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA DEPURACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES POR EL SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO VERTICAL Y HORIZONTAL

Memoria presentada por el Licenciado D. Juan Ramón Pidre Bocardo para optar al Grado de
Doctor por la Universidad de Cádiz,
Programa de Doctorado de Tecnología del Medio ambiente



Fdo.: Juan Ramón Pidre Bocardo

Cádiz, Octubre de 2010

La presente Tesis Doctoral ha sido dirigida por D. José María Quiroga Alonso, Catedrático de Universidad del Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente de la Universidad de Cádiz y D. Juan José Salas Rodríguez, Coordinador del Área de Tecnologías del Agua de la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua.

Los Directores,

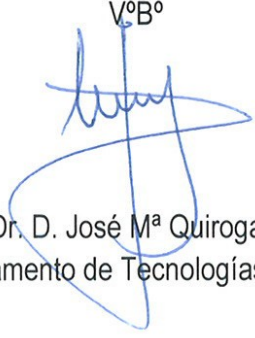


Fdo.: Dr. D. José Mª Quiroga Alonso



Fdo.: Dr. D. Juan José Salas Rodríguez

VºBº



Fdo.: Dr. D. José Mª Quiroga Alonso
Director del Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente



ÍNDICES

Índice General

ÍNDICES.....	1
Índice General	3
Índice de Tablas	8
Índice de Figuras	13
Índice de Ilustraciones	18
Índice de Ecuaciones.....	22
 OBJETO Y CONTENIDO DE LA MEMORIA	 25
 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	 31
1 INTRODUCCIÓN: LA NECESIDAD DE LA DEPURACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES	31
1.1 Influencia sobre el medio receptor de los vertidos de las aguas sin tratar	32
1.2 Influencia sobre el ser humano de los vertidos de las aguas residuales sin tratar	34
1.3 La influencia de la reutilización en la gestión hidrológica	37
2 LA DEPURACIÓN DE LAS AGUAS EN PEQUEÑAS POBLACIONES	39
2.1 El concepto de pequeña población.....	39
2.2 Singularidades del tratamiento de las aguas residuales	39
2.2.1 Costes de inversión y explotación.....	42
2.2.2 Impacto ambiental.....	43
2.2.3 Estacionalidad y dispersión poblacional	43
2.3 Contexto normativo	44
2.4 La problemática de la depuración en pequeñas poblaciones.....	52
2.5 Tecnologías aplicables al tratamiento de las aguas de pequeños núcleos de población.....	55
3 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS: LOS DIFERENTES CONCEPTOS DE HUMEDAL ARTIFICIAL	58
3.1 Conceptos y fundamentos.....	59
3.2 Clasificación de los Humedales Artificiales	60
3.3 Humedales Artificiales de Flujo Superficial.....	61
3.4 Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial.....	62
3.4.1 Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal	63
3.4.2 Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical	65
3.4.3 Otras modalidades de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical	66
3.5 Esquemas típicos de funcionamiento	70

3.5.1	Humedales Artificiales de Flujo Superficial	70
3.5.2	Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial	71
3.6	Mecanismos de depuración	73
3.6.1	Eliminación de sólidos en suspensión	73
3.6.2	Eliminación de materia orgánica	76
3.6.3	Eliminación de nutrientes	80
3.6.4	Eliminación de patógenos	85
3.6.5	Eliminación de metales pesados	86
3.7	Rangos poblacionales para la aplicación de los Humedales Artificiales	87
3.8	Condiciones climáticas para la aplicación de los Humedales Artificiales	88
3.9	Rendimientos de depuración de los Humedales Artificiales	89
3.9.1	Humedales Artificiales de Flujo Superficial	89
3.9.2	Humedales de Flujo Subsuperficial	91
3.10	Puesta en marcha de una instalación de Humedales Artificiales	91
3.11	Mantenimiento y explotación de instalaciones de Humedales Artificiales	92
3.11.1	Mantenimiento del Pretratamiento y Tratamiento Primario	93
3.11.2	Mantenimiento de los Humedales Artificiales	95
3.11.3	Seguimiento del proceso	99
3.12	Problemas más frecuentes: la colmatación del sustrato	103
3.12.1	Depósito de sedimentos	104
3.12.2	Precipitados químicos	104
3.12.3	Formación de biopelícula	105
3.12.4	Morfología de las raíces de la plantas	105
3.12.5	Degradación del propio sustrato	106
3.13	Otras anomalías	106
3.14	Ventajas e inconvenientes de los Humedales Artificiales	107
3.15	Modelos de diseño de los Humedales Artificiales	108
3.15.1	Modelo de Reed y colaboradores	110
3.15.2	Modelo de Kadlec y Knight	112
3.15.3	Modelo SINT (Société d'Ingénierie Nature & Technique)	114
3.15.4	Otros modelos	115
3.16	Estudios de investigación y experiencias I+D sobre Humedales Artificiales en España	116
3.16.1	Andalucía	116
3.16.2	Canarias	118
3.16.3	Castilla-La Mancha	121

3.16.4	Castilla y León.....	122
3.16.5	Cataluña.....	124
3.16.6	Comunidad Valenciana	126
3.16.7	Galicia	127
3.17	Investigaciones a nivel mundial	128
3.18	Grado de implantación de los Humedales Artificiales.....	130
CAPÍTULO II: EL PLAN I+D DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE ANDALUCÍA.....		139
1	LOS ANTECEDENTES DEL PLAN I+D DE HUMEDALES ARTIFICIALES.....	139
2	EL PLAN I+D DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN ANDALUCÍA	145
2.1	Revisión del estado del arte de la tecnología de Humedales Artificiales.....	146
2.2	Investigaciones en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes.....	146
2.3	Estudio de integración social de los Humedales Artificiales	147
2.4	Plan Piloto de Humedales Artificiales	147
2.5	Plan Director de Humedales Artificiales	148
3	LA PLANTA EXPERIMENTAL DE CARRIÓN DE LOS CÉSPEDES (PECC)	149
4	INSTALACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN LA PECC	154
4.1	Esorrentía superficial o canal de plantas emergentes	154
4.2	Prototipo "DBV, Filtro Vertical, modelo V8"	156
4.3	Prototipo de la empresa Optimia Medio Ambiente S.L.	159
4.4	Prototipo de la empresa Macrofitas S.L.....	161
4.5	Los Humedales Artificiales objeto del estudio	163
CAPÍTULO III: MATERIAL Y MÉTODO.....		167
1	PLAN DE MUESTREO Y ANÁLISIS	167
1.1	La toma de muestras y mediciones <i>in situ</i>	167
1.2	Determinaciones analíticas físico químicas	168
2	PARÁMETROS DE CONTROL.....	171
2.1	Medida de los caudales	171
2.2	Tiempo de Retención Hidráulica.....	171
2.3	Cálculos de las cargas	171
2.3.1	Determinación de la Carga Orgánica Superficial	171
2.3.2	Determinación de la Carga de Sólidos Superficial	172
2.3.3	Determinación de la Carga de Nutrientes Superficial	172
2.3.4	Determinación de la Carga Hidráulica Superficial.....	173

3	TOMA DE DATOS DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA	174
4	PROTOTIPOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN	175
4.1	Características del Pretratamiento	175
4.2	Características del tanque Imhoff	176
4.3	Características constructivas de los Humedales Artificiales	177
4.3.1	El confinamiento	177
4.3.2	La impermeabilización	178
4.3.3	La evacuación de los efluentes depurados	180
4.3.4	La ventilación del sustrato filtrante	186
4.3.5	Las capas de áridos: análisis granulométrico	187
4.3.6	El sistema de reparto de las aguas a tratar	193
4.3.7	La plantación	194
4.4	Características generales de los Humedales Artificiales	199
4.4.1	Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical	199
4.4.2	Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal	202
4.4.3	Humedal Artificial de Flujo Superficial	206
	CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	211
1	CARACTERIZACIÓN DEL INFLUENTE	213
1.1	Composición	213
1.2	Biodegradabilidad	214
1.3	Influencia de la pluviometría en la composición	215
2	COMPORTAMIENTO DEL TRATAMIENTO PRIMARIO	217
2.1	Condiciones operativas	217
2.2	Rendimientos de eliminación	218
2.3	Influencia de las condiciones operativas	218
3	COMPORTAMIENTO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	223
3.1	Humedales de Flujo Subsuperficial Vertical	223
3.1.1	Humedal Vertical HV1	223
3.1.2	Humedal Vertical HV3	234
3.2	Humedal de Flujo Subsuperficial Horizontal	245
3.2.1	Humedal Horizontal HH2	245
3.3	Combinaciones de Humedales Artificiales	256
3.3.1	Combinación HV1 + HH5	256
3.3.2	Combinación HH2 + HH6	271

3.3.3	Combinación HV3 + H4	285
4	COMPARATIVA ENTRE LAS DISTINTAS TIPOLOGÍAS HUMEDALES ARTIFICIALES.....	300
4.1	Humedales de Flujo Subsuperficial Vertical y Horizontal	300
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES		311
BIBLIOGRAFÍA		317
ANEXO I: DATOS METEOROLÓGICOS.....		333
ANEXO II: RESULTADOS EXPERIMENTALES.....		338

Índice de Tablas

Tabla 1. Valores típicos de las ARU en las pequeñas aglomeraciones (Salas, 2007).....	41
Tabla 2. Tratamientos exigidos en función de la población y zona de vertido, según la Directiva 91/271/CEE	45
Tabla 3. Calendario de actuaciones previstas en la DMA.....	48
Tabla 4. Conexión entre DMA y la Directiva 91/271/CEE	49
Tabla 5. Características medias de las corrientes de entrada y salida a un conjunto de Humedales Artificiales de Flujo Superficial (EPA 2000).....	90
Tabla 6. Rendimientos de depuración de Humedales Artificiales de Flujo Superficial.....	90
Tabla 7. Rendimientos de depuración en Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial	91
Tabla 8. Requisitos para los vertidos procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas.....	101
Tabla 9. Requisitos para los vertidos en zonas sensibles propensas a eutrofización.....	102
Tabla 10. Parámetros de diseño de los Humedales Artificiales de Flujo Superficial	109
Tabla 11. Parámetros de diseño de los humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial.....	109
Tabla 12. Características de los diferentes medios empleados como sustratos en los HAFSs .	111
Tabla 13. Valores de K_r y θ_R , para cada tipo de contaminante	112
Tabla 14. Valores umbrales para los distintos contaminantes	113
Tabla 15. Valores de los parámetros K_t , θ_R y C^* , para los distintos contaminantes.....	114
Tabla 16. Parámetros analizados y métodos de referencia	169
Tabla 17. Valores de la relación DBO_5/DQO	170
Tabla 18. Características de los Humedales Horizontales del estudio	202
Tabla 19. Características constructivas de los Humedales estudiados	212
Tabla 20. Caracterización del influente.....	213
Tabla 21. Valores típicos de las ARU para medianas y grandes poblaciones (Salas, 2007)	214
Tabla 22. Valores típicos de las ARU para pequeñas poblaciones (Salas, 2007)	214
Tabla 23. Caracterización del influente en base a su biodegradabilidad	214
Tabla 24. Condiciones operativas del tanque Imhoff	217
Tabla 25. Características del efluente del tanque Imhoff	218
Tabla 26. Rendimiento de eliminación de contaminantes en el tanque Imhoff	218

Tabla 27. Valores operacionales del HV1	223
Tabla 28. Valores operacionales del HV1 (continuación)	224
Tabla 29. Valores del efluente y rendimiento del HV1	224
Tabla 30. Valores del efluente y rendimiento del HV1 (continuación)	224
Tabla 31. Valores globales obtenidos en el HV1	228
Tabla 32. Valores globales obtenidos en el HV1 (continuación)	228
Tabla 33. Comparativa con los parámetros de vertido en el HV1	229
Tabla 34. Comparativa con los parámetros de vertido en el HV1	229
Tabla 35. Porcentajes de valores dentro de los límites de vertido en el estudio del HV1	230
Tabla 36. Valores operacionales del HV3	234
Tabla 37. Valores operacionales del HV3 (continuación)	235
Tabla 38. Valores del efluente y rendimiento del HV3	235
Tabla 39. Valores del efluente y rendimiento del HV3 (continuación)	235
Tabla 40. Valores globales obtenidos en el HV3	238
Tabla 41. Valores globales obtenidos en el HV3 (continuación)	239
Tabla 42. Comparativa con los parámetros de vertido en el HV3	239
Tabla 43. Comparativa con los parámetros de vertido en el HV3	240
Tabla 44. Porcentajes de valores dentro de los límites de vertido en el estudio del HV3	242
Tabla 45. Valores operacionales del HH2	245
Tabla 46. Valores operacionales del HH2 (continuación)	245
Tabla 47. Valores del efluente y rendimiento del HH2	246
Tabla 48. Valores del efluente y rendimiento del HH2	246
Tabla 49. Valores globales obtenidos en el HH2	249
Tabla 50. Valores globales obtenidos en el HH2 (continuación)	250
Tabla 51. Comparativa con los parámetros de vertido en el HH2	250
Tabla 52. Comparativa con los parámetros de vertido en el HH2	251
Tabla 53. Porcentajes de valores dentro de los límites de vertido en el estudio del HV3	253
Tabla 54. Valores operacionales del HH5	256
Tabla 55. Valores operacionales del HH5 (continuación)	257
Tabla 56. Valores del efluente y rendimiento de la combinación HV1+HH5	257
Tabla 57. Valores del efluente y rendimiento de la combinación HV1+HH5 (continuación)	258
Tabla 58. Valores del efluente y rendimiento del HH5	258

Tabla 59. Valores del efluente y rendimiento del HH5 (continuación).....	258
Tabla 60. Valores globales obtenidos en la combinación HV1+HH5	261
Tabla 61. Valores globales obtenidos en la combinación HV1+HH5 (continuación).....	261
Tabla 62. Comparativa con los parámetros de vertido de la combinación HV1+HH5.....	267
Tabla 63. Comparativa con los parámetros de vertido de la combinación HV1+HH5.....	268
Tabla 64. Porcentajes de valores dentro de los límites de vertido en el estudio del HV1+HH5. 270	
Tabla 65. Valores operacionales del HH6.....	271
Tabla 66. Valores operacionales del HH6 (continuación)	271
Tabla 67. Valores del efluente y rendimiento de la combinación HH2+HH6.....	272
Tabla 68. Valores del efluente y rendimiento de la combinación HH2+HH6 (continuación)	272
Tabla 69. Valores del efluente y rendimiento del HH6	273
Tabla 70. Valores del efluente y rendimiento del HH6 (continuación).....	273
Tabla 71. Valores globales obtenidos en la combinación HH2+HH6	275
Tabla 72. Valores globales obtenidos en la combinación HH2+HH6 (continuación).....	276
Tabla 73. Comparativa con los parámetros de vertido de la combinación HH2+HH6.....	282
Tabla 74. Comparativa con los parámetros de vertido de la combinación HH2+HH6.....	282
Tabla 75. Porcentajes de valores dentro de los límites de vertido en el estudio del HH2+HH6. 285	
Tabla 76. Valores operacionales del H4	286
Tabla 77. Valores operacionales del H4 (continuación).....	286
Tabla 78. Valores del efluente y rendimiento de la combinación HV3+H4.....	286
Tabla 79. Valores del efluente y rendimiento de la combinación HV3+H4 (continuación)	287
Tabla 80. Valores del efluente y rendimiento del H4.....	287
Tabla 81. Valores del efluente y rendimiento del H4 (continuación)	287
Tabla 82. Valores globales obtenidos en la combinación HV3+H4.....	290
Tabla 83. Valores globales obtenidos en la combinación HV3+H4 (continuación)	290
Tabla 84. Comparativa con los parámetros de vertido de la combinación HV3+H4	296
Tabla 85. Comparativa con los parámetros de vertido de la combinación HV3+H4	297
Tabla 86. Porcentajes de valores dentro de los límites de vertido en la salida del estudio del HV3+H4	299
Tabla 87. Rangos aplicados de carga orgánica superficial y valores medios	300
Tabla 88. Rangos aplicados de carga y valores medios de las concentraciones en los efluentes	301

Tabla 89. Comportamiento de los humedales HV1, HV3 y HH2	304
Tabla 90. Rangos aplicados de carga de nitrógeno y valores medios en el HH5	306
Tabla 91. Datos meteorológicos, año 2006	334
Tabla 92. Datos meteorológicos, año 2007	334
Tabla 93. Datos meteorológicos, año 2008	335
Tabla 94. Datos meteorológicos, año 2009	335
Tabla 95. Valores de concentración en el influente en el año 2006	339
Tabla 96. Valores de concentración en el influente en el año 2007	340
Tabla 97. Valores de concentración en el influente en el año 2008	341
Tabla 98. Valores de concentración en el influente en el año 2009	342
Tabla 99. Valores de concentración en la salida del tanque Imhoff en el año 2006	343
Tabla 100. Valores de concentración en la salida del tanque Imhoff en el año 2007	344
Tabla 101. Valores de concentración en la salida del tanque Imhoff en el año 2008	345
Tabla 102. Valores de concentración en la salida del tanque Imhoff en el año 2009	346
Tabla 103. Valores de concentración en la salida del HV1 en el año 2006	347
Tabla 104. Valores de concentración en la salida del HV1 en el año 2007	348
Tabla 105. Valores de concentración en la salida del HV1 en el año 2008	349
Tabla 106. Valores de concentración en la salida del HV1 en el año 2009	350
Tabla 107. Valores de concentración en la salida del HH2 en el año 2006	351
Tabla 108. Valores de concentración en la salida del HH2 en el año 2007	352
Tabla 109. Valores de concentración en la salida del HH2 en el año 2008	353
Tabla 110. Valores de concentración en la salida del HH2 en el año 2008	354
Tabla 111. Valores de concentración en la salida del HV3 en el año 2006	355
Tabla 112. Valores de concentración en la salida del HV3 en el año 2007	356
Tabla 113. Valores de concentración en la salida del HV3 en el año 2008	357
Tabla 114. Valores de concentración en la salida del HV3 en el año 2009	358
Tabla 115. Valores de concentración en la salida del HH5 en el año 2006	359
Tabla 116. Valores de concentración en la salida del HH5 en el año 2007	360
Tabla 117. Valores de concentración en la salida del HH5 en el año 2008	361
Tabla 118. Valores de concentración en la salida del HH5 en el año 2009	362
Tabla 119. Valores de concentración en la salida del HH6 en el año 2006	363
Tabla 120. Valores de concentración en la salida del HH6 en el año 2007	364

Tabla 121. Valores de concentración en la salida del HH6 en el año 2008	365
Tabla 122. Valores de concentración en la salida del HH6 en el año 2009	366
Tabla 123. Valores de concentración en la salida del H4 en el año 2007	367
Tabla 124. Valores de concentración en la salida del H4 en el año 2008.....	368
Tabla 125. Valores de concentración en la salida del H4 en el año 2009.....	369

Índice de Figuras

Figura 1. Relación entre caudal y nº de habitantes para poblaciones menores de 2.000 (Salas, 2007).....	40
Figura 2. Evolución diaria del caudal, sólidos en suspensión y DBO ₅ en las ARU (Salas, 2007)	41
Figura 3. Costes de inversión (sin emisarios) para el caso de Aireaciones Prolongadas (García, 2007).....	42
Figura 4. Corte longitudinal de un Humedal Artificial de Flujo Superficial (Martín, 2007).....	61
Figura 5. Cortes longitudinales de Humedales A. de Flujo Subsuperficial Horizontal y Vertical (Martín, 2007)	63
Figura 6. Esquema del sistema de depuración “mariposa” en Koh Phi Phi Don (Brix, 2007,a) ...	69
Figura 7. Esquema de funcionamiento de un Humedal de Flujo Superficial	71
Figura 8. Relación entre conductividad hidráulica y formación de biomasa (Wallace, 2006).....	105
Figura 9. Evolución de los Humedales Artificiales implantados en España (Puigagut, 2006)....	131
Figura 10. Ensayos de granulometría de los distintos sustratos	190
Figura 11. Evolución de la concentración de DBO ₅ en el influente frente a la pluviometría	215
Figura 12. Evolución de la concentración de SST en el influente frente a la pluviometría	216
Figura 13. Carga eliminada de sólidos en el tanque Imhoff frente a tiempo de retención hidráulica	219
Figura 14. Carga de sólidos eliminada en el tanque Imhoff frente a velocidad ascensional	220
Figura 15. Carga orgánica eliminada en el tanque Imhoff frente a tiempo de retención hidráulica	220
Figura 16. Carga orgánica eliminada en el tanque Imhoff frente a velocidad ascensional.....	221
Figura 17. Evolución de la concentración de SST en el influente y enfluente del tanque Imhoff	222
Figura 18. Evolución de la concentración de DBO ₅ en el influente y enfluente del tanque Imhoff	222
Figura 19. Valores de concentración de DBO ₅ de salida del HV1 frente a los de entrada	225
Figura 20. Carga orgánica eliminada frente a carga de entrada en el HV1	226
Figura 21. Concentración de DBO ₅ a la entrada y salida del HV1	226
Figura 22. Carga eliminada de SST frente a carga de entrada en el HV1	227
Figura 23. Carga eliminada de Nt frente a carga de entrada en el HV1	227

Figura 24. Valores de concentración de DBO ₅ a lo largo del estudio en la salida del HV1	230
Figura 25. Valores de concentración de DQO a lo largo del estudio en la salida del HV1	231
Figura 26. Valores de concentración de SST a lo largo del estudio en la salida del HV1	231
Figura 27. Valores de concentración de Nt a lo largo del estudio en la salida del HV1	232
Figura 28. Valores de la K _{DBO5} para el HV1 en diferentes rangos de carga	233
Figura 29. Valores de la K _{DBO5} para el HV1 durante los años de estudio	234
Figura 30. Carga orgánica eliminada frente a carga de entrada en el HV3	236
Figura 31. Concentración de DBO ₅ a la salida y salida del HV3	237
Figura 32. Carga eliminada de SST frente a carga de entrada en el HV3	237
Figura 33. Carga eliminada de Nt frente a carga de entrada en el HV3	238
Figura 34. Valores de concentración de DBO ₅ a lo largo del estudio en el HV3	240
Figura 35. Valores de concentración de DQO a lo largo del estudio en el HV3	241
Figura 36. Valores de concentración de SST a lo largo del estudio en el HV3	241
Figura 37. Valores de concentración de Nt a lo largo del estudio en el HV3	242
Figura 38. Valores de la K _{DBO5} para el HV3 en diferentes rangos de carga	243
Figura 39. Valores de la K _{DBO5} para el HV3 durante los años de estudio	244
Figura 40. Carga orgánica eliminada frente a carga de entrada en el HH2	247
Figura 41. Concentración de DBO a la salida del HH2	248
Figura 42. Carga eliminada de SST frente a carga de entrada en el HH2	248
Figura 43. Carga eliminada de Nt frente a carga de entrada en el HH2	249
Figura 44. Valores de concentración de DBO ₅ a lo largo del estudio en el HH2	251
Figura 45. Valores de concentración de DQO a lo largo del estudio en el HH2	252
Figura 46. Valores de concentración de los SST a lo largo del estudio en el HH2	252
Figura 47. Valores de concentración de los Nt a lo largo del estudio en el HH2	253
Figura 48. Valores de la K _{DBO5} para el HH2 en diferentes rangos de carga	254
Figura 49. Valores de la K _{DBO5} para el HH2 durante los años de estudio	255
Figura 50. Carga orgánica eliminada frente a carga de entrada en el HH5	259
Figura 51. Carga eliminada de SST frente a carga de entrada en el HH5	260
Figura 52. Carga eliminada de Nt frente a carga de entrada en el HH5	260
Figura 53. Evolución de la DBO ₅ a lo largo del estudio en distintas etapas de la combinación HV1+HH5	262

Figura 54. Valores medios de la concentración de DBO_5 a la salida de distintas etapas de HV1+HH5.....	262
Figura 55. Evolución de la DQO a lo largo del estudio en distintas etapas de HV1+HH5.....	263
Figura 56. Valores medios de la concentración de DQO a la salida de distintas etapas de HV1+HH5.....	263
Figura 57. Evolución de los SST a lo largo del estudio en distintas etapas de HV1+HH5	264
Figura 58. Valores medios de la concentración de SST a la salida de distintas etapas de HV1+HH5.....	264
Figura 59. Evolución del Nt a lo largo del estudio en distintas etapas de HV1+HH5	265
Figura 60. Valores medios de la concentración de Nt a la salida de distintas etapas de HV1+HH5	265
Figura 61. Evolución del Pt a lo largo del estudio en distintas etapas de HV1+HH5	266
Figura 62. Valores medios de la concentración de Pt a la salida de distintas etapas de HV1+HH5	266
Figura 63. Relación DBO_5/DQO en las distintas etapas de la combinación HV1+HH5	267
Figura 64. Valores de concentración de DBO_5 a lo largo del estudio en la salida del HV1+HH5.....	268
Figura 65. Valores de concentración de DQO a lo largo del estudio en la salida del HV1+HH5	269
Figura 66. Valores de concentración de SST a lo largo del estudio en la salida del HV1+HH5	269
Figura 67. Valores de concentración de Nt a lo largo del estudio en la salida del HV1+HH5	270
Figura 68. Carga orgánica eliminada frente a carga de entrada en el HH6	274
Figura 69. Carga eliminada de SST frente a carga de entrada en el HH6	274
Figura 70. Carga eliminada de Nt frente a carga de entrada en el HH6	275
Figura 71. Evolución de la DBO_5 a lo largo del estudio en distintas etapas de HH2+HH6.....	276
Figura 72. Valores medios de la concentración de DBO_5 a la salida de distintas etapas de HH2+HH6	277
Figura 73. Evolución de la DQO a lo largo del estudio en distintas etapas de HH2+HH6	277
Figura 74. Valores medios de la concentración de DQO a la salida de distintas etapas de HH2+HH6	278
Figura 75. Evolución de los SST a lo largo del estudio en distintas etapas de HH2+HH6.....	278
Figura 76. Valores medios de la concentración de SST a la salida de distintas etapas de HH2+HH6	279
Figura 77. Evolución del Nt a lo largo del estudio en distintas etapas de HH2+HH6.....	279

Figura 78. Valores medios de la concentración de Nt a la salida de distintas etapas de HH2+HH6	280
Figura 79. Evolución del Pt a lo largo del estudio en distintas etapas de HH2+HH6	280
Figura 80. Valores medios de la concentración de Pt a la salida de distintas etapas de HH2+HH6	281
Figura 81. Relación DBO ₅ /DQO en distintos puntos	281
Figura 82. Valores de concentración de DBO ₅ a lo largo del estudio en la salida del HH2+HH6	283
Figura 83. Valores de concentración de DQO a lo largo del estudio en la salida del HH2+HH6	283
Figura 84. Valores de concentración de SST a lo largo del estudio en la salida del HH2+HH6.	284
Figura 85. Valores de concentración de Nt a lo largo del estudio en la salida del HH2+HH6	284
Figura 86. Carga orgánica eliminada frente a carga de entrada en el H4.....	288
Figura 87. Carga eliminada de SST frente a carga de entrada en el H4	288
Figura 88. Carga eliminada de Nt frente a carga de entrada en el H4.....	289
Figura 89. Evolución de la DBO ₅ a lo largo del estudio en distintas etapas de HV3+H4	291
Figura 90. Valores medios de la concentración de DBO ₅ a la salida de distintas etapas de HV3+H4	291
Figura 91. Evolución de la DQO a lo largo del estudio en distintas etapas de HV3+HS4.....	292
Figura 92. Valores medias de la concentración de DQO a la salida de distintas etapas de la HV3+H4	292
Figura 93. Evolución de los SST a lo largo del estudio en distintas etapas de la HV3+H4.....	293
Figura 94. Valores medias de la concentración de SST a la salida de distintas etapas de HV3+H4	293
Figura 95. Evolución del Nt a lo largo del estudio en distintas etapas de HV3+H4.....	294
Figura 96. Valores medias de la concentración de Nt a la salida de distintas etapas de HV3+H4	294
Figura 97. Evolución del Pt a lo largo del estudio en distintas etapas de HV3+H4	295
Figura 98. Valores medias de la concentración de Pt a la salida de distintas etapas de HV3+H4	295
Figura 99. Relación DBO ₅ /DQO en distintos puntos de HV3+H4	296
Figura 100. Valores de concentración de DBO ₅ a lo largo del estudio en la salida del HV3+h4	297
Figura 101. Valores de concentración de DQO a lo largo del estudio en la salida del HV3+H4	298

Figura 102. Valores de concentración de SST a lo largo del estudio en la salida del HV3+H4 .	298
Figura 103. Valores de concentración de Nt a lo largo del estudio en la salida del HV3+H4.....	299
Figura 104. Representación de valores medios de DBO ₅ de salida frente a la carga orgánica en el HV1.....	302
Figura 105. Representación de valores medios de DBO ₅ de salida frente a la carga orgánica en el HV3.....	302
Figura 106. Representación de valores medios de DBO ₅ de salida frente a la carga orgánica en el HH2.....	303
Figura 107. Representación de valores medios de Nt de salida frente a la carga orgánica en el HH5.....	306
Figura 108. Valores de temperatura mínima a lo largo del estudio.....	336
Figura 109. Valores de temperatura máxima a lo largo del estudio.....	336
Figura 110. Valores de temperatura media a lo largo del estudio.....	337
Figura 111. Valores de evaporación y precipitación a lo largo del estudio	337

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Siega manual de la plantación de carrizo una vez seca	97
Ilustración 2. Siega mecanizada de la plantación de carrizo una vez seca.....	97
Ilustración 3. Evacuación de la biomasa seca tras la siega de un Humedal.....	98
Ilustración 4. Evolución de la vegetación de un Humedal Subsuperficial tras su siega (Febrero 2006).....	98
Ilustración 5. Evolución de la vegetación de un Humedal Subsuperficial tras su siega (Marzo 2006).....	99
Ilustración 6. Aspecto típico de un Humedal Artificial colmatado	103
Ilustración 7. Instalación piloto a la salida del Lagunajes de Mojácar-Garrucha-Torre (Almería).....	117
Ilustración 8. Instalación piloto en la EDAR Los Gallardos, Almería	117
Ilustración 9. Esquema de funcionamiento de la EDAR del Campus Universitario de Tafira.....	119
Ilustración 10. Localización de la depuradora dentro de las instalaciones universitarias.....	119
Ilustración 11. Vista general del sistema de tratamiento.....	120
Ilustración 12. Estanque Facultativo	120
Ilustración 13. Vegetación del sistema de tratamiento: <i>Phragmites</i> y <i>Canna indica</i>	121
Ilustración 14. Instalación piloto en la Universidad Castilla-La Mancha	122
Ilustración 15. Planta Experimental de Mansilla de las Mulas.....	123
Ilustración 16. Instalaciones piloto en la azotea de la Universidad Politécnica de Cataluña.....	126
Ilustración 17. Diagrama de flujo de la instalación piloto de Os Liñares	127
Ilustración 18. Diagrama de flujo de la instalación piloto sita en las proximidades de Santiago de Compostela.....	128
Ilustración 19. EDAR de Verdú, 2.000 h.e. (Lérida)	132
Ilustración 20. EDAR de Corbins, 2.000 h.e. (Lérida)	132
Ilustración 21. EDAR d'Alfés (Lérida)	133
Ilustración 22. Humedal Artificial de Flujo Superficial de Can Cabanyes, Granollers (Barcelona)	133
Ilustración 23. Diagrama de flujo de la EDAR de La Muela (Algodonales, Cádiz)	134
Ilustración 24. EDAR de La Muela (Algodonales, Cádiz)	135
Ilustración 25. EDAR de Albondón (Granada)	135

Ilustración 26. EDAR del Albergue Juvenil de Algeciras (Cádiz)	136
Ilustración 27. EDAR del Albergue Juvenil de Cortes de la Frontera (Málaga).....	136
Ilustración 28. Fases del Plan I+D de Humedales Artificiales en Andalucía	145
Ilustración 29. Foto aérea de la PECC en el 2009	152
Ilustración 30. Lagunaje de la PECC (2009)	153
Ilustración 31. Filtros de Turba de la PECC (2009).....	153
Ilustración 32. Primera instalación piloto de Humedales Artificiales en la PECC	154
Ilustración 33. Esquema de funcionamiento de instalación piloto en la PECC (COPT, 1999) ...	155
Ilustración 34. Instalación del sistema piloto DBV modelo V8.....	156
Ilustración 35. Fotografías del montaje de las tuberías de drenaje del sistema piloto	157
Ilustración 36. Decantador – Digestor con filtro de arlita.....	157
Ilustración 37. Tubería de alimentación del sistema piloto.....	158
Ilustración 38. Arqueta de salida.....	158
Ilustración 39. Vista general del Humedal con la vegetación ya desarrollada.....	159
Ilustración 40. Vista general del Humedal de la empresa Optimia Medio Ambiente S.L.....	161
Ilustración 41. Vista general del Humedal de la empresa Macrofitas S.L.	162
Ilustración 42. Vista general de la Estación Meteorológica de la PECC	174
Ilustración 43. Vista general del Pretratamiento.....	176
Ilustración 44. Secciones del tanque Imhoff.....	176
Ilustración 45. Vaso de uno de los Humedales Artificiales.....	177
Ilustración 46. Perfilado de los taludes de un Humedal Artificial.....	178
Ilustración 47. Colocación de una lámina de geotextil en un Humedal Artificial.....	179
Ilustración 48. Vista de un Humedal Artificial tras finalizar la etapa de impermeabilización.....	179
Ilustración 49. Detalle de la sujeción de la lámina plástica mediante grapa metálica	180
Ilustración 50. Chapa deflectora en el Humedal Artificial de Flujo Superficial.....	181
Ilustración 51. Tubería de drenaje para la evacuación en un Humedal Flujo Horizontal.....	181
Ilustración 52. Detalle del enlace de las tuberías de drenaje con la tubería de salida	182
Ilustración 53. Recubrimiento de las tuberías de evacuación de efluentes.....	182
Ilustración 54. Tubería de evacuación de efluentes conectada a las tuberías de drenaje	183
Ilustración 55. Conjunto de tuberías de drenaje para la evacuación en un Humedal de Flujo Vertical.....	183

Ilustración 56. Tuberías de drenaje conectadas con la arqueta de salida en un Humedal de Flujo Vertical.....	184
Ilustración 57. Tuberías de drenaje cubiertas con una capa de grava en un Humedal de Flujo Vertical.....	184
Ilustración 58. Recubrimiento de las tuberías de drenaje por el fondo de un Humedal de Flujo Vertical.....	185
Ilustración 59. Detalles de las tuberías de evacuación de efluentes en la arqueta de salida.....	185
Ilustración 60. Colocación de las chimeneas de ventilación en un Humedal Artificial de Flujo Vertical.....	186
Ilustración 61. Detalle de las chimeneas de ventilación en un Humedal Artificial de Flujo Vertical.....	186
Ilustración 62. Penetración de los rizomas y raíces en el sustrato.....	187
Ilustración 63. Descarga directa de áridos en el interior de un Humedal Artificial.....	191
Ilustración 64. Descarga de áridos mediante cubilete en un Humedal Artificial.....	191
Ilustración 65. Distribución mecánica de los áridos en un Humedal Artificial de Flujo Horizontal.....	192
Ilustración 66. Distribución manual de áridos en un Humedal Artificial.....	192
Ilustración 67. Tuberías de reparto en un Humedal Artificial de Flujo Horizontal.....	193
Ilustración 68. Tuberías para el reparto de la alimentación en un Humedal Artificial de Flujo Vertical.....	194
Ilustración 69. Aspecto del Humedal de Flujo Superficial recién plantado.....	195
Ilustración 70. Aspecto del Humedal de Flujo Superficial al año de su plantación.....	195
Ilustración 71. Planta de <i>Phragmites australis</i> procedente de vivero.....	196
Ilustración 72. Distribución de las bandejas con plantas a lo largo del HV1.....	197
Ilustración 73. Detalle de Humedal Artificial tras su plantación con plantas de vivero.....	197
Ilustración 74. Humedal Artificial al año de su plantación.....	198
Ilustración 75. Trozos de rizomas de <i>Phragmites australis</i> preparados para su plantación.....	198
Ilustración 76. Características del sustrato del Humedal Artificial de Flujo Vertical HV1.....	200
Ilustración 77. Características del sustrato del Humedal Artificial de Flujo Vertical HV3.....	201
Ilustración 78. Aspecto del Humedal Artificial de Flujo Vertical HV1.....	201
Ilustración 79. Aspecto del Humedal Artificial de Flujo Vertical HV3.....	202
Ilustración 80. Aspecto del Humedal Artificial de Flujo Horizontal HH2.....	203

Ilustración 81. Características del Humedal Artificial de Flujo Horizontal HH5	204
Ilustración 82. Características del Humedal Artificial de Flujo Horizontal HH6	204
Ilustración 83. Detalle del tanque Imhoff dispuesto en cabecera de los Humedales Artificiales	205
Ilustración 84. Detalle de la cámara de bombeo, sondas de nivel y electroválvulas	205
Ilustración 85. Vista parcial del Humedal Artificial de Flujo Superficial	206
Ilustración 86. Diagrama de funcionamiento de los Humedales Artificiales en el transcurso de la investigación	207
Ilustración 87. Imagen aérea de los Humedales Artificiales de la investigación	208

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo de los SST en el efluente de Humedales de Flujo Superficial	74
Ecuación 2. Cálculo de la Carga Hidráulica Superficial	74
Ecuación 3. Cálculo de los SST en el efluente de Humedales de Flujo Subsuperficial	75
Ecuación 4. Cálculo de la eliminación del fósforo	84
Ecuación 5. Cálculo del abatimiento de patógenos	86
Ecuación 6. Cálculos de la constante de la reacción K_t	86
Ecuación 7. Cálculo de la eliminación de contaminantes (Reed, 1995).....	110
Ecuación 8. Cálculo del tiempo de retención hidráulica	110
Ecuación 9. Cálculo de la constante K_t respecto a la temperatura	111
Ecuación 10. Cálculo de la superficie total del humedal (Reed, 1995)	112
Ecuación 11. Cálculo de la superficie de un humedal (Kadlec, 1996)	113
Ecuación 12. Cálculo de la superficie según el modelo SINT	114
Ecuación 13. Cálculo de la Carga Orgánica Superficial.....	172
Ecuación 14. Cálculo de la Carga de Sólidos Superficial	172
Ecuación 15. Cálculo de la Carga de Nitrógeno Superficial.....	172
Ecuación 16. Cálculo de la Carga de Fósforo Superficial	172
Ecuación 17. Cálculo de la Carga Hidráulica Superficial	173
Ecuación 18. Ecuación para el cálculo de la superficie de un humedal (Kadlec, 1996).....	232

OBJETO Y CONTENIDO DE LA MEMORIA

OBJETO Y CONTENIDO DE LA MEMORIA

La investigación práctica y directamente aplicable es algo que caracteriza a las dos instituciones de las que formo parte. Tanto en el Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente de la Universidad de Cádiz, como en la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA), son sobresalientes los trabajos que se realizan buscando aportar soluciones a problemas, concretamente en lo referente al desarrollo e innovación de nuevas tecnologías de depuración de aguas residuales.

Lamentablemente la depuración de las aguas residuales sigue siendo una asignatura pendiente en la difícil “carrera” del desarrollo sostenible. Aunque con notables avances, aún no se cumplen los objetivos de calidad en muchas de nuestras masas de aguas y la principal causa de ello sigue siendo la contaminación de las mismas por el aporte de agua residual sin el suficiente tratamiento.

Para abordar el reto de llegar al 100% de depuración y, por consiguiente, contribuir a la mejora del estado ecológico de los ecosistemas hídricos – tal y como viene impuesto por la Directiva Marco del Agua – el Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino, en colaboración con las Comunidades Autónomas, redactó el *Plan Nacional de Calidad de las Aguas: Saneamiento y Depuración 2007-2015*. Este nuevo Plan plantea un conjunto de medidas que persiguen el definitivo cumplimiento de la Directiva 91/271/CEE y contribuir a alcanzar el objetivo del buen estado ecológico, que propugna para el año 2015 la Directiva Marco de Aguas.

Entre las medidas que propone el mencionado Plan, se encuentra el tratamiento de las aguas residuales generadas en los núcleos menores de 2.000 habitantes equivalentes. Es en este rango poblacional donde se dan los mayores déficits en cuanto a la cobertura de población servida. Y es precisamente en estos tamaños de población donde se ha comprobado que las tecnologías llamadas convencionales no funcionan adecuadamente. Debido a la generalizada escasez de recursos económicos y a falta de personal con alta especialización en estas zonas, desde hace años se propicia que sean tecnologías alternativas las que se implanten en las mismas.

En los últimos tiempos entre las tecnologías que tienen reducidos costes de mantenimiento y simplicidad operativa está sobresaliendo a nivel internacional la conocida como Humedales Artificiales.

La administración hidráulica de Andalucía, conocedora de que por sus propias características geográficas y sociales (muchos núcleos pequeños de población distribuidos en un amplio territorio) tenía que buscar soluciones alternativas para la correcta depuración de las aguas residuales generadas en los mismos, impulsó en el año 2006 el llamado Plan I+D de Humedales Artificiales.

Dicho Plan lo que persigue es analizar si la mencionada tecnología puede ser, al igual que está sucediendo en otras zonas del mundo, una solución sostenible para estos pequeños núcleos.

La presente memoria forma parte de las investigaciones que se han propiciado dentro del referido Plan I+D. Dicho plan comenzó con una revisión profunda del estado del arte y una fuerte apuesta por fomentar investigaciones relacionadas con esta materia en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes, instalación experimental que ha servido de soporte a las investigaciones que aquí se exponen y que se describe en el Capítulo II de la presente memoria.

A continuación, y de forma muy somera, se describen los contenidos que se abordan en cada uno de los capítulos que conforman la presente memoria.

El Capítulo I se dedica a introducir la problemática de la depuración de las aguas residuales en las pequeñas poblaciones y a describir en profundidad, a través de una revisión bibliográfica, los fundamentos, características y grado de implementación de la tecnología de depuración conocida como Humedales Artificiales.

El Capítulo II resume los principales puntos y fases del Plan Andaluz de I+D de Humedales Artificiales, que, como se ha comentado anteriormente, ha permitido investigaciones como la presente.

Los sistemas pilotos utilizados para la experimentación y la metodología empleada durante la investigación se describen en el Capítulo III. El apartado Resultados y Discusión conforma el

Capítulo IV, el cual se subdivide a su vez en varios bloques. El primero muestra las características del agua influente usada en la investigación, el segundo expone el comportamiento del tratamiento primario utilizado, y en el tercero y cuarto se analiza en profundidad el funcionamiento de cada uno de los sistemas pilotos durante todo el período de investigación.

Por último, en el Capítulo V se presentan las Conclusiones Finales, fruto de las investigaciones llevadas a cabo.

Con estos apartados que conforman la Memoria, y haciéndose eco de la importancia de la problemática reseñada al principio, con el presente trabajo de investigación se pretenden alcanzar los siguientes objetivos generales:

- Profundizar en el estudio del comportamiento de distintas modalidades de Humedales Artificiales aplicadas a la depuración de las aguas residuales urbanas
- Evaluar la viabilidad de distintas combinaciones de Humedales Artificiales con vistas a mejorar los rendimientos de depuración alcanzados de forma individualizada
- Establecer los rangos óptimos de operación de distintas modalidades y combinaciones de Humedales Artificiales para el cumplimiento con la normativa de vertidos

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

1 INTRODUCCIÓN: LA NECESIDAD DE LA DEPURACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

La depuración de las aguas residuales urbanas es un proceso asumido y aceptado ampliamente por la sociedad española del siglo XXI. Y es que es de todo conocido que el vertido de las aguas residuales urbanas sin depurar constituye el principal foco de contaminación de nuestras masas de aguas, tanto de las superficiales como de las subterráneas. Por ello, independientemente del origen y características de las aguas residuales, éstas deben ser tratadas adecuadamente, tanto si su destino final es el vertido como si van a ser reutilizadas.

Con la depuración pretendemos cumplir con tres objetivos fundamentales:

- Proteger el buen estado ecológico de los medios receptores, principio en el que se basa la Directiva Marco del Agua y respecto al cual gira toda la legislación relacionada y por tanto la actual política hidráulica.
- Evitar riesgos para la salud pública, así como la de otros seres vivos vinculados de una u otra manera al sistema hídrico.
- Producir efluentes con características físicas, químicas y microbiológicas aptos para su regeneración y posterior reutilización.

La depuración de las aguas residuales debe ser, por tanto, un proceso universal, aplicable a todo tipo de aglomeraciones urbanas independientemente del tamaño de las mismas.

En el párrafo anterior se definen lo que podemos denominar principales puntos de intersección entre el ser humano y el ciclo hidrológico en la fase de devolución del agua usada:

- por un lado está, lo que hoy por hoy es la mayor afección sobre las masas de aguas: el vertido sin depurar de las aguas que anteriormente hemos retirados de él, usado y que deberíamos devolver en las mejores condiciones posibles;
- en segundo lugar, las masas de agua nos "devuelven" la afección que le causamos, y se convierten en el principal vehículo de muchas enfermedades;
- y en último lugar, en determinadas zonas como Andalucía, hemos visto que para mantener los niveles de consumo actuales de agua hemos de fomentar el practicar un "regateo" al ciclo hidrológico que nos permita alargar algún tiempo la vida útil de las aguas por él prestada. Es lo que conocemos como reutilización de las aguas regeneradas (aquellas depuradas lo suficientemente habilitándolas para volver a usarlas).

1.1 Influencia sobre el medio receptor de los vertidos de las aguas sin tratar

Cuando se habla sobre la contaminación y sus efectos sobre los ecosistemas acuáticos, es preciso puntualizar que su respuesta es distinta según se trate de una contaminación orgánica, de un aporte extraordinario de nutrientes inorgánicos, de una contaminación por patógenos, o por moléculas sintéticas o tóxicos, o contaminación térmica o mecánica. Respecto a la contaminación por vertidos de aguas residuales urbanas no depuradas estamos refiriéndonos principalmente a los tres primeros grupos (materia orgánica, nutrientes inorgánicos y patógenos).

El vertido de aguas residuales urbanas sin depurar ejerce sobre los cauces receptores los siguientes efectos negativos:

- Aparición de fangos y flotantes: si las aguas residuales se vierten sin tratar pueden originar sedimentos sobre el fondo, o dar lugar a la acumulación de grandes cantidades de sólidos en la superficie y/o en las orillas de los cauces receptores, formando capas de flotantes. Los depósitos de fangos y flotantes no sólo son desagradables a la vista sino que, además, al contener materia orgánica pueden llegar a provocar el agotamiento del oxígeno disuelto presente en las aguas y originar el desprendimiento de malos olores.

- Agotamiento del contenido de oxígeno presentes en las aguas: los organismos acuáticos necesitan oxígeno para vivir. Al verter a los cauces residuos fácilmente oxidables, las bacterias empezarán a alimentarse y consumirán oxígeno del medio. Si este consumo es excesivo, el contenido en oxígeno del agua descenderá por debajo de valores mínimos necesarios para el desarrollo de la vida acuática, produciéndose su muerte. Por otro lado, se generarán olores desagradables, al tener lugar procesos anaerobios en los que se desprenden determinadas sustancias causantes de los mismos.
- Aportes excesivos de nutrientes: las aguas residuales contienen nutrientes (nitrógeno y fósforo principalmente) capaces de producir excesivos crecimientos de algas y otras plantas en los cauces receptores (eutrofización). Estos crecimientos pueden llegar a impedir el empleo de estas aguas para usos domésticos e industriales.

Los ecosistemas acuáticos disponen de especies capaces de actuar sobre la materia orgánica destruyéndola. En el caso de un aporte de nutrientes, existen mecanismos naturales de eliminación de los mismos como la desnitrificación o la precipitación de fósforo. En ambos casos, una vez producida la contaminación, los ecosistemas pueden volver a recuperar el primitivo equilibrio, si el vertido ha sido puntual y de poca consideración. Se produce el proceso que conocemos como *autodepuración*.

Se puede hacer una serie de generalizaciones del comportamiento de los ecosistemas sometidos a cualquier tipo de contaminación.

En primer lugar, las comunidades afectadas siempre muestran un descenso de la diversidad. Los ecosistemas equilibrados, tanto terrestres como acuáticos, se caracterizan por tener comunidades compuestas por gran número de especies que tienen un relativamente bajo número de individuos cada una, ligadas entre sí por una intrincada red de relaciones. Así se consigue el mantenimiento de la comunidad con un mínimo gasto energético.

Una alteración del equilibrio, por ejemplo por una contaminación, provoca normalmente la desaparición de la mayoría de las especies, quedando favorecidas unas pocas que pueden proliferar al estar libres de competidores.

Otra generalización que se puede hacer es que aumenta la relación Producción/Biomasa. La energía que ingresa en el ecosistema contaminado consta de dos partidas: la energía fijada por los productores primarios y la energía química aportada por las sustancias orgánicas que proceden del exterior del ecosistema o bien, de cadáveres de los organismos muertos *in situ* por la contaminación. El cociente entre la energía total ingresada dividida por la biomasa existente es más alto en las aguas contaminadas que en los ecosistemas no alterados, lo que va asociado a organismos de dimensiones pequeñas, vida breve y metabolismo muy alto.

Es decir, la contaminación representa una alteración de las condiciones en el sentido opuesto a la sucesión o proceso natural de *auto-organización* de los ecosistemas, y supone por lo tanto, una regresión con los fenómenos característicos de aumento del flujo de energía (mayor tasa de renovación de los organismos, mayor respiración por unidad de biomasa) y de simplificación de la estructura de las comunidades.

1.2 Influencia sobre el ser humano de los vertidos de las aguas residuales sin tratar

Los vertidos de aguas residuales sin tratar a cauces públicos provocan un indiscutible peligro para la salud pública, ya que se fomenta la propagación de virus, bacterias y otros agentes patógenos para el ser humano. Entre las enfermedades que pueden propagarse a través de las aguas contaminadas por los vertidos de aguas residuales urbanas, destacan: el tifus, el cólera, la disentería, la polio y la hepatitis. En la actualidad se conocen unos 30 tipos de infecciones importantes que pueden transmitirse a través de las aguas residuales.

Los principales agentes infecciosos, para el hombre y los animales, que pueden encontrarse en un agua residual bruta pueden clasificarse en tres grupos: los ya mencionados virus y bacterias y los parásitos intestinales (protozoos, helmintos y nematodos).

Del orden de 100 tipos diferentes de virus entéricos son excretados en las heces humanas, llegando a contarse, en personas infectadas, hasta un millón de partículas víricas por gramo de

heces; en aguas residuales sin depurar se han llegado a detectar hasta 100.000 partículas virales por litro.

Los virus no se multiplican fuera de la célula huésped y son muy resistentes a las condiciones medio ambientales. Pueden sobrevivir en aguas residuales y en el suelo durante varios meses, y no son fácilmente destruidos por los habituales procesos de desinfección, por lo que aguas libres de bacterias pueden contener virus activos.

En el caso de las bacterias, gran número de especies son huéspedes habituales del intestino de personas sanas y, por tanto, son excretadas con las heces. El tracto intestinal puede también albergar bacterias patógenas (bacterias entéricas), que, cuando se excretan, pueden causar una gran variedad de enfermedades. El tiempo de supervivencia de las bacterias en las aguas residuales es menor que para los virus, dependiendo en gran medida de las condiciones ambientales. En un agua residual pueden detectarse numerosos tipos diferentes de bacterias, algunas de las cuales tienen como vía principal de transmisión los alimentos contaminados. Entre ellas, en nuestro país, los organismos patógenos que ocasionan un mayor número de casos relacionados con enfermedades de transmisión hídrica corresponden a *Shigella spp.*, *Escherichia coli* y *Salmonella spp.*, si bien *Yersinia enterocolitica* y *Campylobacter jejuni* comienzan a ocupar un lugar importante.

El último grupo antes referido es el de los parásitos intestinales (protozoos y helmintos). Las infecciones parasitarias intestinales se encuentran prácticamente distribuidas por todo el mundo, registrándose tasas elevadas de prevalencia en numerosas regiones. En la actualidad, en nuestro país, la incidencia de las helmintiasis ha descendido notablemente debido, sobre todo, a la mejora de las condiciones sanitarias y al mejor tratamiento y eliminación de las aguas residuales urbanas.

En lo referente a los protozoos, las aguas residuales pueden contener gran variedad de protozoos patógenos capaces de originar diferentes infecciones del tracto intestinal humano. Las vías de exposición más frecuentes son el contacto persona a persona, los alimentos contaminados por manipuladores y el agua. Las aguas residuales urbanas también son portadoras de diferentes helmintos parásitos, pertenecientes a distintos grupos zoológicos, que

pueden originar enfermedades muy variadas en los seres humanos (*Ascariasis*, *Enterobiasis*, *Teniasis*). Los ciclos biológicos de la mayoría de los helmintos son complejos y requieren, en algunos casos, la estancia en un huésped intermediario. El estadio infeccioso de algunos helmintos es el organismo adulto o la larva, mientras que, en otros casos, los huevos o los quistes son las formas infecciosas de estos organismos. Tanto los huevos como las larvas son resistentes a las condiciones medioambientales y pueden sobrevivir durante el proceso de desinfección del agua residual.

La concentración de organismos patógenos generalmente disminuye tras la excreción, llegando, incluso, a perder la capacidad de infección. Los virus y protozoos siempre decrecen en número, mientras que las bacterias pueden desarrollarse si encuentran un hábitat rico en nutrientes y una flora competitiva mínima. Los helmintos, excepto los trematodos que tengan un molusco como hospedador intermediario, descenderán después de la excreción.

Los organismos entéricos patógenos sobreviven durante periodos de tiempo que, en algunos casos, pueden ser extremadamente largos, tanto en el suelo como en el agua y cultivos si las condiciones son favorables para su desarrollo. Los factores implicados en la supervivencia de organismos en el medio ambiente incluyen, entre otros, el tipo y número de organismos, materia orgánica, temperatura, humedad, pH, luz, protección de las hojas y composición de la flora microbiana. La diversidad de cepas y de factores influyentes, así como las diferencias entre las técnicas analíticas empleadas, muestran, en bastantes casos, una amplia variación en los correspondientes tiempos de supervivencia.

Resumiendo los apartados anteriores podemos decir que las estaciones depuradoras van a eliminar una elevada proporción de los contaminantes presentes en las aguas residuales, vertiendo efluentes depurados, los cuales puedan ser asimilados de forma natural por los cauces receptores. Puede, por tanto, considerarse a las estaciones de depuración como un “complemento artificial, e imprescindible hoy en día” de los procesos naturales que se dan en las masas acuáticas, al haberse sobrepasado ampliamente su capacidad de autodepuración.

1.3 La influencia de la reutilización en la gestión hidrológica

Las aguas residuales varían notablemente en composición, pero a fin de cuentas siempre es agua en la que van incorporadas materias de distinta índole según el uso al que haya sido sometida. Una retirada sin más de esta agua, del ciclo hidrológico epicontinental (como podría ser con el vertido al mar) nos substraería de un volumen importante de un bien cada vez más escaso. Es por tanto que la reutilización del agua residual depurada se plantea, sobre todo en aquellas zonas donde existe una creciente demanda y una gran dificultad en aumentar la oferta de agua susceptible de ser utilizada, como una opción de futuro, como un "banco" de reservas de recursos, no sólo del componente agua sino también de todos aquellos elementos en ocasiones beneficiosos que ella contiene (p.e. nutrientes).

Inseparable al término reutilización debe aparecer el de tratamiento, es preciso tratar las aguas que se quieren aprovechar de nuevo, de modo que cumplan las condiciones que ese segundo uso requiere. Cada tipo de reutilización exige un tratamiento previo determinado que puede ir desde una simple decantación a un complejo sistema de desinfección. La reutilización debe concebirse como una cadena, en la que se van utilizando los efluentes de una actividad como influente de otra que requiera menor calidad.

Buena parte del volumen del agua residual depurada es sometida a una *Reutilización Indirecta* ya que no la extraemos del ciclo hidrológico susceptible de ser utilizado sino que lo incorporamos a un cauce (normalmente natural). Aguas abajo del vertido del efluente se vuelve a tomar esa misma agua para otros usos. Esta reutilización suele contar siempre con un proceso de autodepuración natural en el cauce de vertido que complementa la regeneración del agua residual depurada.

Cuando el efluente, ya tratado, es transportado de forma independiente al punto del nuevo aprovechamiento y se almacena o regula para que pueda ser utilizado de forma continua, se denomina *Reutilización Directa*. El proceso de tratamiento necesario para que el agua residual pueda ser utilizada se denomina proceso de regeneración, y el resultado de dicho proceso se denomina agua regenerada.

El 8 de diciembre de 2007 se publicó el Real decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas, y que regula de una manera clara cualquier tipo de reuso que se quiera realizar con las aguas residuales urbanas depuradas.

2 LA DEPURACIÓN DE LAS AGUAS EN PEQUEÑAS POBLACIONES

2.1 El concepto de pequeña población

El tamaño de la población puede establecerse en función del número de habitantes y/o carga contaminante (habitantes equivalentes, en adelante h.e.), que es el criterio comúnmente aplicado para diferenciar entre pequeñas, medianas y grandes poblaciones.

A nivel mundial no existe un consenso en cuanto al número de habitantes a partir del cual una población se puede considerar pequeña. Por una parte, en la Unión Europea se suelen considerar pequeñas aglomeraciones urbanas aquellas con una población inferior a los 2.000 h.e., coincidiendo con el límite establecido por la Directiva 91/271/CEE, por debajo del cual las aguas residuales requieren un tratamiento adecuado, independientemente de que viertan a aguas costeras o a aguas continentales y estuarios. Este ha sido el criterio aplicado por la mayor parte de los estados miembros de la UE para desarrollar su propia legislación y planes de saneamiento y establecer los límites de vertido. Por otra parte, la *International Water Association* (IWA) define la pequeña población como aquella con un número de habitantes inferior a 4.000 h.e., distinguiendo entre muy pequeñas poblaciones (de 1 a 10 familias), poblaciones medianas (50-500 h.e.) y poblaciones de mayor tamaño (500-4.000 h.e.).

2.2 Singularidades del tratamiento de las aguas residuales

Las aguas residuales generadas en pequeños núcleos de población difieren de las generadas en las medianas y grandes aglomeraciones, principalmente en dos aspectos esenciales: el caudal y su composición. Estas diferencias están motivadas principalmente por los diferentes tipos de actividades que en ellos se desarrollan.

Cuanto más pequeño es el núcleo más fuertes son las oscilaciones del caudal de las aguas residuales que en él se generan. Pasándose, en el caso de muy pequeñas poblaciones (< 50 h.e.), de caudales casi nulos a primeras horas de la mañana, a caudales puntas que superan ocho veces el caudal medio.

La Figura 1 muestra la relación entre el cociente caudal máximo y caudal medio (Q_{\max}/Q_{med}), y el número de habitantes, para aglomeraciones inferiores a 2.000 habitantes.

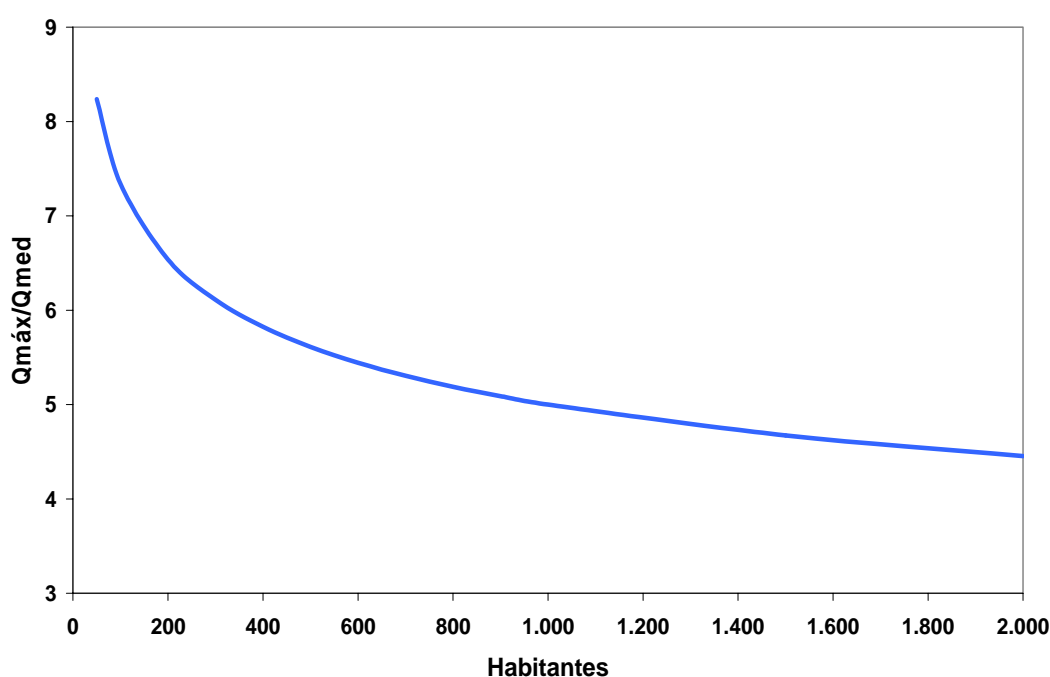


Figura 1. Relación entre caudal y nº de habitantes para poblaciones menores de 2.000 (Salas, 2007)

Como puede observarse en la figura anterior, la relación (Q_{\max}/Q_{med}) crece exponencialmente a medida que disminuye el número de habitantes.

Las menores dotaciones de abastecimiento que, de forma general, se registran en las pequeñas aglomeraciones urbanas, tiene una traducción inmediata en las composiciones de las aguas residuales que se generan. La menor dotación de abastecimiento conduce a una menor dilución de los contaminantes generados por la población, lo que se traduce en incrementos de la concentración de los mismos. Por tanto, las pequeñas poblaciones se caracterizan, en general, por generar un “pequeño” volumen de aguas residuales pero fuertemente contaminadas.

La Tabla 1 recoge los rangos medios de los principales parámetros que normalmente caracterizan las aguas residuales generadas en pequeñas aglomeraciones, aguas constituidas, predominantemente, por aportaciones domésticas.

Tabla 1. Valores típicos de las ARU en las pequeñas aglomeraciones (Salas, 2007)

Parámetro	Rango habitual
Sólidos en Suspensión (mg/l)	300 – 500
DBO ₅ (mg/l)	400 – 600
DQO (mg/l)	800 – 1.200
Nitrógeno (mg N/l)	50 – 100
Fósforo (mg P/l)	10 – 20
Grasas (mg/l)	50 – 100
Coliformes Totales (UFC/100 ml)	10 ⁷ -10 ⁸

Estos datos deben tomarse meramente a título orientativo, dado que en ciertas situaciones, bien por drenaje directo de infiltraciones a la red de colectores, bien porque a esta red se conectan corrientes naturales de agua, se generan unas aguas residuales urbanas más diluidas. Por tanto en el caso de las pequeñas aglomeraciones se hace aún más necesaria, si cabe, la realización de campañas de aforo y muestreo para la correcta caracterización de las aguas residuales, como paso previo al diseño de la unidad de tratamiento en cada situación concreta.

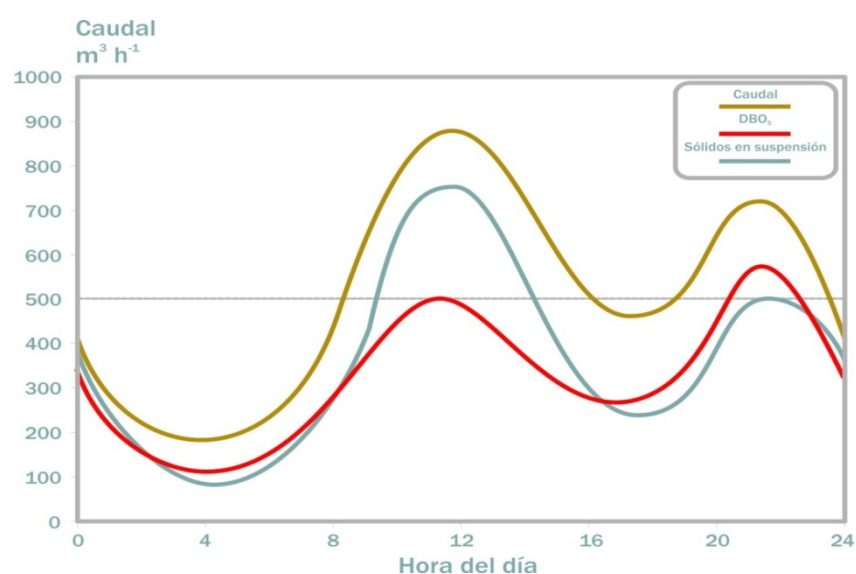


Figura 2. Evolución diaria del caudal, sólidos en suspensión y DBO₅ en las ARU (Salas, 2007)

De manera similar a la forma que en que fluctúan a lo largo del día los caudales de las aguas residuales que llegan a las estaciones depuradoras, de forma general fluctúan también su composición. La Figura 2 muestra las fluctuaciones típicas en la concentración de sólidos en suspensión y DBO₅.

2.2.1 Costes de inversión y explotación

Además de estos dos aspectos esenciales, caudal y composición, existen otras peculiaridades a tener en cuenta en la selección de las tecnologías a aplicar en estas pequeñas poblaciones y en el diseño de las mismas. Uno de ellos es el *factor económico*, concretamente la economía de escala. A menor tamaño de la población mayor es el coste de la depuración por habitante. Esto queda claramente reflejado en la Figura 3, en la cual a modo de ejemplo se representan los costes de inversión para una de las tecnologías de depuración más extendidas: la Aireación Prolongada.

Por debajo de cierto número de habitantes, los costes son difícilmente asumibles por la población y es necesario recurrir a soluciones de gestión distintas a la gestión directa por parte de cada ayuntamiento. Por ello, y para salvar en la medida de lo posible este efecto, a la hora de seleccionar el tratamiento se debería considerar en lo posible tecnologías poco costosas en implantación y explotación y recurrir a soluciones de gestión de tipo supramunicipal de las infraestructuras de depuración.

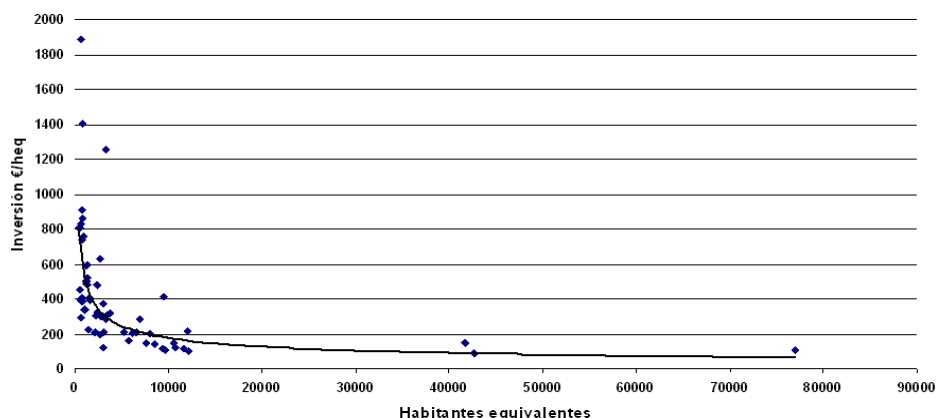


Figura 3. Costes de inversión (sin emisarios) para el caso de Aireaciones Prolongadas (García, 2007)

2.2.2 Impacto ambiental

Otro de los factores a considerar es el *impacto ambiental* asociado al vertido, y por ende, la localización del mismo. Los vertidos de aguas residuales procedentes de pequeñas aglomeraciones urbanas, a pesar del pequeño volumen que en teoría representan, pueden tener un impacto significativo sobre el medio receptor en función de la sensibilidad de dicho medio. Si los vertidos tienen lugar en zonas de alto valor ecológico o en masas de agua con caudales circundantes mínimos, las aguas deben ser sometidas a un tratamiento intenso que permita que su descarga al medio ambiente produzca el mínimo efecto. En otros casos, la alta capacidad de autodepuración del medio permite el vertido de las aguas residuales directo o tras un tratamiento simple (primario).

2.2.3 Estacionalidad y dispersión poblacional

Los cambios estacionales de población tienen también una gran influencia en la generación de vertidos en las pequeñas aglomeraciones, alterando de manera considerable las características del mismo y el impacto en el medio. Hay incluso poblaciones que únicamente están habitadas en determinados meses al año. Estas variaciones estacionales complican el diseño de las instalaciones de depuración.

La depuración de las aguas residuales urbanas es tanto más compleja cuanto mayor es el grado de dispersión de la población. Una consecuencia directa de la dispersión de la población es la aparición de numerosos núcleos de menor tamaño, que no siempre pueden ser aglomerados para tratar sus aguas de manera conjunta y reducir costes.

La definición de las aglomeraciones, según recoge la Directiva 91/271/CEE, es fundamental para abordar la depuración de los pequeños núcleos de población. Implica no sólo determinar aquellos núcleos que se van a sanear de manera conjunta en la misma estación de tratamiento, sino, igualmente, determinar que parte de la población quedará sin aglomerar y se someterá a tratamiento descentralizado o *in situ*. Esta definición debe hacerse teniendo en cuenta numerosos factores, fundamentalmente económicos, técnicos y medioambientales y puede llegar

a ser bastante complicada dependiendo del grado de dispersión de la población. La definición de las aglomeraciones influye de manera decisiva en los costes de saneamiento y depuración, en su eficacia y en el impacto final sobre el medio natural.

En algunas zonas de España aún no se encuentran bien definidas estas aglomeraciones, lo cual dificulta mucho la tarea de realizar una diagnosis de la situación actual en relación con el grado de saneamiento y depuración de los pequeños núcleos.

2.3 Contexto normativo

Es extensa la legislación que regula la depuración y vertido de las aguas residuales urbanas, tanto a nivel nacional como internacional. En el caso de España, como el resto de países miembros de la UE, la legislación básica en materia de tratamiento de aguas residuales urbanas está determinada por la Directiva 91/271/CEE. La finalidad de esta Directiva es proteger el medio ambiente contra todo deterioro debido al vertido de esas aguas. Para ello, establece unos requerimientos mínimos para la recogida, tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas, y de las aguas residuales de algunos sectores industriales. La Tabla 2 muestra el tratamiento mínimo exigido para las aguas residuales, según se viertan a aguas costeras o a aguas dulces y estuarios.

Para las pequeñas poblaciones menores a 2.000 h.e., la Directiva 91/271/CEE obliga a que las aguas residuales reciban un *tratamiento adecuado* siendo éste “cualquier proceso y/o sistema de eliminación en virtud del cual, después del vertido de dichas aguas, las aguas receptoras cumplan con los objetivos de calidad pertinentes y las disposiciones pertinentes de la presente y de las restantes Directivas comunitarias”. Como puede observarse, dicha definición incluye el objetivo final del tratamiento pero no especifica los límites de calidad del vertido ni el tipo de tecnología que permite su consecución. Esta “indefinición” del tratamiento adecuado ha constituido un serio problema a las administraciones competentes a la hora de proponer y crear infraestructuras de saneamiento y depuración. De hecho, algunas administraciones “reclaman” el establecimiento de unos límites de vertido al igual que se realiza para las aglomeraciones superiores a 2.000 h.e.

Tabla 2. Tratamientos exigidos en función de la población y zona de vertido, según la Directiva 91/271/CEE

Vertido en aguas Costeras				
Tamaño aglomeración	Zona menos sensible	Zona normal	Zona sensible	
0 – 10.000 h.e.	T.A	T.A	T.A	
10.000-150.000 h.e.	T. 1º	T.2º	T.3º	
>150.000 h.e.	T.2º (ó T.1º)	T.2º	T.3º	
Vertido en aguas Dulces y Estuarios				
Tamaño aglomeración	Zona menos sensible	Zona normal	Zona normal alta montaña	Zona sensible
0 –2.000 h.e.	T.A	T.A	T.A	T.A
2.000-10.000 h.e.	T.1º	T.2º	T.2º (-)	T.2º
> 10.000 h.e.	T.2º	T.2º	T.2º (-)	T.3º

T.A: Tratamiento adecuado: Tratamiento tal que se cumplan los objetivos de calidad de las aguas receptoras.

T.1º: Tratamiento primario: DBO5 > 20%; SS> 50%.

T.2º: DBO5> 70-90% o < 25 mg/l ; DQO > 75% o < 125 mg/l; SS > 90% o < 35 mg/l

T.3º: Nt >70-80% o <15 mg/l, Pt > 80% o < 2 mg/l para 10000<Pob<100000 h.e., Nt >70-80% o <10 mg/l, Pt > 80% o < 1 mg/l para Pob> 100000 h.e.

Ante esta situación de indefinición surge la pregunta, muy extendida en medios profesionales y científicos, sobre la necesidad de un contexto normativo específico para regular los vertidos procedentes de pequeñas poblaciones, como ya se ha hecho en otros países.

En cualquier caso, con el tratamiento adecuado se debe cumplir con los objetivos de calidad de los cuerpos receptores de agua, tal y cómo define la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE, así como otras directivas sectoriales relacionadas con el vertido de aguas residuales (Directivas sobre aguas de baño, aguas destinadas a la producción de agua potable, cría de moluscos, aptas para la vida de los peces) y otros aspectos como la reutilización de las aguas depuradas, los futuros paisajes asociados al cambio climático, etc. Esto exige que, previamente a seleccionar el esquema de tratamiento a establecer, la masa de agua debe estar perfectamente caracterizada en lo que a su calidad se refiere y también en cuanto a los objetivos de calidad a alcanzar. Resumiendo, la tecnología seleccionada debe permitir cumplir con los objetivos definidos.

La Directiva 91/271/CEE establecía igualmente un calendario de actuaciones a fin de equipar las aglomeraciones urbanas en el cumplimiento de los criterios establecidos. Según este calendario, todas las aglomeraciones deberían disponer a fecha de 31 de diciembre de 2005 de un tratamiento primario, secundario y/o terciario según las características del medio receptor (zonas sensible, normal o menos sensible).

De acuerdo con el artículo 19 de la Directiva, los Estados miembros debían habilitar las disposiciones legislativas, reglamentarias y administrativas necesarias para dar cumplimiento a la Directiva, a más tardar, el 30 de junio de 1993, es decir, aproximadamente a los dos años de su publicación. Para cumplir con este calendario, la entonces Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Vivienda aprobó el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales (1995-2005) mediante Resolución de 28 de abril de 1995. Asimismo, el 28 de diciembre de 1995 se incorpora al derecho nacional la disposición comunitaria mediante el Real Decreto Ley 11/1995, que establece las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas, señalando las diferentes competencias de las autoridades españolas para alcanzar los objetivos de la Directiva.

En 1996 se aprobó el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del citado Real Decreto Ley 11/1995. Esta disposición complementa las normas sobre recogida, depuración y vertido de las aguas residuales urbanas, y completa la incorporación de la norma comunitaria al ordenamiento jurídico español. Con posterioridad, el Real Decreto 2116/1998, de 2 de octubre, modificó el Real Decreto 509/1996 para recoger la Directiva 98/15/CEE, por la que se modifica la Directiva 91/271/CEE en relación con determinados requisitos establecidos en su Anexo I.

El Plan Nacional de Saneamiento y Depuración (1995-2005) se centró en el cumplimiento de los objetivos definidos en la Directiva comunitaria y con el año 2005 como horizonte. Concretamente los objetivos del Plan fueron los siguientes:

- Facilitar el cumplimiento en plazo de las obligaciones contenidas en la Directiva.
- Planificar y coordinar las actuaciones de todas las Administraciones Públicas con competencias en la materia.
- Establecer la participación de la Administración General del Estado en la financiación de las infraestructuras de saneamiento y depuración.

- En función de los objetivos previstos, se programaron una serie de actuaciones cuyos plazos coincidían con los establecidos en la Directiva. Si bien los resultados de la ejecución de este plan han sido satisfactorios (de un 40,7% de conformidad en el año 1995, se ha pasado a un 77% en el 2005), las actuaciones previstas y ejecutadas se centraron principalmente en el tratamiento de las aguas generadas en medianas y grandes aglomeraciones urbanas, especialmente aquellas de más de 5.000 h.e., consideradas las más contaminantes, dejando de lado, en cierta medida, los pequeños núcleos de población, cuya depuración quedó a voluntad de las políticas realizadas por cada Comunidad Autónoma, existiendo un grado de avance muy heterogéneo según la región.

En el año 2000 se promulga la Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. La Directiva Marco del Agua (DMA) tiene entre sus principales objetivos la protección y mejora de las masas de aguas superficiales y subterráneas y de sus ecosistemas asociados, la reducción progresiva de la contaminación, el garantizar el suministro suficiente de agua superficial o subterránea en buen estado y el paliar los efectos de sequías e inundaciones.

Los artículos de la Directiva establecen numerosas tareas y actividades que definen su proceso de implementación, denominado proceso de planificación. Se trata de un proceso cíclico de largo plazo cuyo primer ciclo termina en el 2015, que es el primer plazo para la consecución de los objetivos medioambientales fijados en la Directiva. En la siguiente tabla se presenta el calendario de las actuaciones planificadas para la consecución de los objetivos establecidos por la DMA.

Esta Directiva ya ha sido transpuesta al ordenamiento jurídico español y se encuentra regulada por la siguiente legislación nacional:

- Real Decreto Legislativo 1/2001 de 20 de julio por el que se aprobó el texto refundido de la Ley de Aguas, modificado por la Ley 62/2003 de 30 de diciembre (por la que se traspone la Directiva 2000/60/CE) y la Ley 11/2005 de 22 de junio.
- Real Decreto 606/2003 de 23 de mayo por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

- Real Decreto 927/1988 de 29 de julio por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de Planificación Hidrológica.

Tabla 3. Calendario de actuaciones previstas en la DMA

Fecha	Actuaciones
22 diciembre 2003	Transposición de la directiva (Art. 24), definición de Demarcaciones Hidrográficas y designación de autoridades competentes (Art. 3)
22 diciembre 2004	Características de la demarcación hidrográfica, estudio del impacto ambiental de la actividad humana y análisis económico del uso del agua (Art.5). Registro de zonas protegidas (Art.6)
22 diciembre 2006	Seguimiento de las aguas superficiales, del estado de las aguas subterráneas y de las zonas protegidas (Art.8). Información y consulta públicas sobre calendario y programa de trabajo del Plan de cuenca (Art.14)
22 diciembre 2007	Esquema provisional de los temas importantes respecto la gestión de agua de la cuenca (Art. 14)
22 diciembre 2008	Consulta pública del borrador del Plan Hidrológico de cuenca (Art. 14)
22 diciembre 2009	Publicación de los Planes Hidrológicos de cuenca (Art.13). Establecimiento de los Programas de Medidas (Art. 11 ap.7)
22 diciembre 2010	Política de precios que proporcione incentivos adecuados para el uso eficiente de los recursos hídricos (Art.9)
22 diciembre 2012	Programas de Medidas operativos (Art. 11)
22 diciembre 2015	Cumplimiento de los objetivos medioambientales (Art.4)

El concepto de calidad ecológica, introducido por la Directiva Marco del Agua, exige garantizar las condiciones de la componente abiótica (*físicoquímicas e hidromorfológicas*) que permitan a la componente biótica mantenerse de una forma equilibrada. Así pues, son las características propias de las comunidades integrantes y asociadas a las masas de agua, además de los usos del recurso, las que imponen los requerimientos de calidad. La conexión de la Directiva 91/271/CEE con la Directiva Marco es la que se muestra en Tabla 4.

En los estudios de la presiones de la actividad humana desarrollados por las cuencas hidrográficas en base a lo establecido en el artículo 5 de la Directiva Marco del Agua, los vertidos de aguas residuales urbanas aparecen como una de las más relevantes.

Tabla 4. Conexión entre DMA y la Directiva 91/271/CEE

DIRECTIVA 2000/60/CE	PUNTOS DE CONEXIÓN ENTRE DIRECTIVAS	DIRECTIVA 91/271/CEE
Artículo 5 y Anejo II	Consideración de la incidencia de la actividad humana sobre el medio ambiente	Artículo 1
Artículo 6 y Anejo IV	Declaración de zonas sensibles	Artículo 5
Artículo 10	Requerimientos específicos para los vertidos	Artículo 17
Artículo 11 y Anejo V	Medidas a incluir en los programas de actuación	Artículo 15

Una de las tareas que se ha acometido en la nueva planificación ha sido la de casar los resultados de estos estudios de presiones e impactos con las necesidades en materia de saneamiento y depuración, con el objetivo de reducir las presiones significativas sobre las masas de agua y minimizar los impactos. Así se han podido identificar las actuaciones para contribuir a mantener el buen estado de las masas de agua.

Más recientemente se ha aprobado el Plan Nacional de Calidad de las Aguas: Saneamiento y Depuración 2007-2015 (PNCA), que da respuesta tanto a los objetivos no alcanzados por el anterior Plan Nacional (1995-2005), como a las nuevas necesidades planteadas por la Directiva Marco del Agua y por el Programa A.G.U.A. (Actuaciones para la Gestión y Utilización del Agua). El PNCA persigue el definitivo cumplimiento de la Directiva 91/271/CEE y pretende contribuir a alcanzar el objetivo del buen estado ecológico que la Directiva Marco del Agua propugna para el año 2015.

El PNCA insiste en la necesidad imperiosa de asegurar la gestión de las instalaciones, ya que de nada sirve construir infraestructuras si no se explotan y mantienen adecuadamente. Por ello, el éxito del Plan requiere la colaboración de todos, y principalmente de las Corporaciones Locales, que son las responsables del saneamiento y depuración de las aguas residuales urbanas.

También dedica especial atención a la depuración de las aguas en aglomeraciones urbanas de pequeño tamaño y a la necesidad de actualizar los sistemas de depuración en aquellas aglomeraciones que se han visto afectadas por la nueva declaración de zonas sensibles llevada a cabo en el 2006.

Por otro lado, uno de los objetivos fundamentales del Programa A.G.U.A. es el de incorporar en la mayor medida posible la reutilización de aguas depuradas para incrementar las disponibilidades de recursos hídricos, práctica que también es potenciada en el PNCA (2007-2015).

Y para finalizar, a través de este plan se continúa con la labor de promover desde el Ministerio de Medio Ambiente la investigación en materia de saneamiento, depuración y calidad de las aguas, diversidad y ecosistemas asociados, siendo el presente trabajo claro ejemplo de ello.

El PNCA 2007-2015 se estructura en cuatro componentes fundamentales:

- Obras de Interés General del Estado ya comprometidas y no ejecutadas, incluidas en el Plan de Saneamiento y Depuración 1995-2005.
- Conjunto de actuaciones derivadas de la declaración de Zonas Sensibles por parte de Portugal y España, que exige las actuaciones complementarias del Tratamiento Terciario.
- Programa de Desarrollo Rural Sostenible, previsto a partir del 2008, como plasmación de la Ley sobre Desarrollo Rural Sostenible que prevé el apoyo estatal de la aplicación del PNCA a los municipios rurales considerados prioritarios, por incorporar Parques Nacionales o espacios de la Red Natura 2000.
- Recoge el resto de actuaciones que corresponderían al conjunto de las Administraciones territoriales pero sobre las que el Ministerio ha anunciado su voluntad de colaborar en su ejecución a través de las Sociedades Estatales del Agua, con el fin de asegurar el cumplimiento de las Directivas Europeas.

La inversión total estimada del Plan Nacional de Calidad de las Aguas 2007-2015 es de 19.007 millones de euros (de 2007), de los que el compromiso de intervención del Ministerio de Medio Ambiente, de una u otra forma, implica un presupuesto total de 6.233 millones de euros (de 2007); 3.046 heredados del primer Plan de Saneamiento, 1.777 asociados a nuevos compromisos de intervención y 1.430 de financiación recuperable en 45 años a través de las Sociedades Estatales. Un punto clave en la financiación de las actuaciones previstas es la firma de Convenios Bilaterales con las Comunidades Autónomas.

El nuevo Plan de Calidad de las Aguas ha establecido una serie de retos que no fueron abordados en el anterior Plan ya que el conjunto de prioridades era muy diferente en el momento en que se redactó y aprobó. Con el 77% de conformidad de depuración alcanzado, el reto fundamental está en mantener ese parque de infraestructuras para garantizar en el tiempo ese alto nivel. Entre los nuevos retos en materia de saneamiento y depuración se encuentra la depuración de los núcleos menores de 2.000 habitantes equivalentes.

Así pues, el PNCA da respuesta a la depuración en pequeños núcleos, que tienen también una significativa afección a los ríos de cabecera, que normalmente son masas de agua con buen estado según la Directiva Marco de Agua. Para ello, dentro del conjunto de actuaciones, se han identificado las que se van a ejecutar en aglomeraciones urbanas con núcleos de población inferior a 2.000 habitantes de derecho, con la singularidad de que se encuentran dentro de espacios protegidos como son los que integran la Red Natura 2000 (zonas LIC, *Lugares de Interés Comunitario*, y zonas ZEPA, *Zonas de Especial Protección de las Aves*).

Además se da la circunstancia de que estos núcleos se encuentran en su mayoría en zona rural, lo que permitiría realizar, con las actuaciones del PNCA, un impulso a un mayor desarrollo, no sólo en el campo medioambiental, sino también socioeconómico.

El Capítulo V del PNCA se ha reservado a las actuaciones previstas para garantizar el cumplimiento de los objetivos ambientales de la Directiva Marco de Agua, algunas de las cuales afectarán a Aglomeraciones Urbanas menores de 2.000 h.e. que deberán disponer de un tratamiento adecuado. Estas actuaciones suponen un inversión de 2.291 millones de euros.

En el apartado final del PNCA, se presenta el calendario previsto para la ejecución del mismo. Dicho calendario está acotado por la fecha del año 2015 que, según la Directiva Marco del Agua, marca la consecución de unos ambiciosos objetivos medioambientales para las masas de agua.

Existen unos plazos críticos, como por ejemplo el año 2010 para aplicar la política de precios que incentive el uso racional del agua, o el plazo de siete años para acometer las inversiones por la nueva declaración de zonas sensibles, con la obligación de revisar esta declaración cada cuatro años.

También, como en todo proceso de planificación, habrá necesidades de revisión periódica y, en particular, como consecuencia de la obligación de hacer una revisión cuatrienal de las zonas sensibles, que indudablemente afectarán a las previsiones de inversión y financiación. La revisión del PNCA se hará anualmente, al mismo tiempo que se revisan los Convenios Bilaterales con la Comunidades Autónomas.

2.4 La problemática de la depuración en pequeñas poblaciones

Las pequeñas aglomeraciones urbanas, por su propia localización geográfica, su tamaño y grado de desarrollo, presentan una problemática específica, que dificulta la provisión de los servicios de saneamiento y depuración.

En esta problemática destacan:

- El hecho de no poder aprovechar las ventajas que supone la economía de escala, como consecuencia de su pequeño tamaño, lo que conduce a que los costes de implantación y de mantenimiento y explotación por habitante sean elevados. Además, en poblaciones dispersas los costes de saneamiento se incrementan notablemente.
- Los costes y la dificultad de explotación pueden ser superiores en aquellos casos en que el vertido se realice sobre masas de agua de alta calidad debido a su nivel de protección (cabecera de los ríos, parques naturales, zonas piscícolas, zonas de baño, zonas destinadas a la captación de agua potable, etc.), En este caso los efluentes depurados deberán cumplir normativas de vertido muy estrictas en función de la calidad exigida en el medio, para lo cual el tratamiento de depuración aplicado deberá ser más completo (eliminación de nitrógeno, fósforo u otros componentes) y por lo tanto con costes de implantación y explotación más elevados.
- La escasa capacidad técnica y económica de las corporaciones locales que rigen este tipo de núcleos para asegurar el mantenimiento y la explotación de sus estaciones depuradoras.

- Las dificultades inherentes a la gestión de los fangos producidos en las depuradoras, que difícilmente pueden ser deshidratados en sus lugares de origen por su escaso volumen, lo que complica su evacuación y disposición final.

Esta problemática puede ser abordada desde distintos puntos de vista:

- Normativo: aplicando límites en la calidad de los vertidos menos restrictivos que los establecidos para aglomeraciones urbanas de más de 2.000 h.e., siempre y cuando se garantice la inalterabilidad de la calidad del medio receptor.
- Tecnológico: seleccionando tecnologías, que garantizando el cumplimiento de los requisitos de vertido, tengan costes de explotación asumibles y sostenibles por la población. En relación a este aspecto, una herramienta muy útil que está siendo desarrollada en la actualidad, son los sistemas expertos para la toma de decisiones, que permiten seleccionar distintas alternativas de tratamiento teniendo en cuenta múltiples criterios (económicos, ambientales, legales).
- De gestión: estableciendo sistemas que optimicen los costes de explotación y garanticen una gestión sostenible, tanto desde el punto de vista técnico, como económico y ambiental.

Independientemente del régimen jurídico de las entidades que operen los sistemas de saneamiento y depuración (la propia entidad local, sociedad pública, empresa privada o empresa mixta), la competencia y por lo tanto la responsabilidad de la gestión del alcantarillado y tratamiento de aguas residuales generadas en su término municipal, es de las corporaciones locales (Art. 25 de la Ley 7/1985, de 2 de abril, Reguladora de las Bases de Régimen Local).

No obstante, en el artículo 36 se recoge la competencia de las Diputaciones Provinciales en la coordinación de los servicios municipales, la asistencia y cooperación jurídica, económica y técnica a los municipios, especialmente los de menor capacidad económica y de gestión así como la posible prestación de servicios públicos de carácter supramunicipal y, en su caso supracomarcal.

Son varios los modelos de gestión aplicables al tratamiento de las aguas residuales en las pequeñas aglomeraciones:

- Gestión municipal, en la que la prestación del servicio la realiza el propio municipio con sus recursos, bien de forma directa o a través de un contrato con una entidad social (sin ánimo de lucro) o empresa privada. Esta fórmula sólo es viable si se trata de un municipio con recursos económicos altos o que pueda adoptar sistemas de depuración extensivos de bajo coste de explotación.
- Gestión mancomunada, o asociación de varios municipios para compartir los costes y personal asociados a la prestación del servicio. Este sistema permite disminuir los costes de explotación y disponer de personal especializado para la gestión y explotación de las estaciones depuradoras incluidas en la mancomunidad o en el consorcio.
- Gestión regional o provincial, prestada por una entidad pública dependiente del gobierno autonómico o de una diputación provincial. Al tener un ámbito tan grande y gestionar sistemas de saneamiento y depuración de pequeñas y grandes poblaciones, además de aprovechar las ventajas derivadas de la economía de escala (mejores servicios a mas bajo precio), puede redistribuir los costes entre los ciudadanos de los núcleos grandes y pequeños, estableciendo un canon o precio único de depuración en función de los metros cúbicos de agua consumida.

Un aspecto importante y singular de la gestión de la depuración de pequeñas poblaciones, lo constituye la gestión de los fangos producidos en las estaciones de tratamiento. El principal problema que se plantea es la dificultad generalizada de deshidratar los fangos *in situ* debido a la ineficiencia de los sistemas de deshidratación para volúmenes de fangos tan pequeños. También es ineficiente, por el mismo motivo el transporte de fangos individualizado para cada depuradora, dado las grandes distancia existentes entre los centros productores y los centros receptores (vertederos, estaciones de compostaje, etc.).

Salvo casos excepcionales, la tendencia usual es a establecer sistemas integrados de gestión de fangos que abarquen a una comarca, provincia, o región, que dispongan de instalaciones de deshidratación centralizadas en estaciones depuradora grandes o medianas, sistema de transporte de fangos líquidos, estabilizados o no, mediante camiones cisternas, desde las

depuradoras pequeñas, y centros de recepción y tratamiento de fangos deshidratados (vertederos, compostaje, incineración, etc.) de carácter comarcal o provincial. De esta forma se abaratan costes y es posible gestionar los fangos con garantías.

2.5 Tecnologías aplicables al tratamiento de las aguas de pequeños núcleos de población

Como ha sido comentado en apartados anteriores, las aguas residuales generadas en pequeñas poblaciones deben ser sometidas a un tratamiento adecuado, según lo establecido por la Directiva 91/271/CEE y la legislación española de referencia. Sin embargo, ninguna legislación hace referencia a los límites de calidad de los efluentes depurados, siendo difícil determinar las tecnologías a emplear para alcanzar dicho grado de tratamiento.

Realmente, la mayoría de las tecnologías de depuración existentes en la actualidad son aplicables a las pequeñas aglomeraciones, si bien algunas tecnologías son más apropiadas que otras. El diseño y explotación de plantas de depuración en pequeños núcleos debe realizarse con la misma eficacia que se hace en los grandes, si bien deben emplearse otros criterios de selección:

- Prioridad de procesos que requieran un tiempo mínimo de operador.
- Equipos que requieran un mínimo de mantenimiento.
- Funcionamiento eficaz ante un amplio rango de caudal y carga (en núcleos pequeños las variaciones son grandes).
- Gasto mínimo de energía.
- Instalaciones donde los posibles fallos de equipos y proceso causen el mínimo deterioro de calidad en el efluente.
- Máxima integración en el medio ambiente.

Las tecnologías de depuración pueden ser clasificadas en dos grandes bloques: tecnologías intensivas y extensivas. La diferencia entre ambos tipos de sistemas radica en dos aspectos

fundamentales: el empleo de equipos electromecánicos con la consecuente necesidad de aportar energía al sistema, y la superficie requerida para su implantación. Mientras que las tecnologías intensivas se caracterizan por acelerar los procesos de depuración mediante el suministro externo de energía, las tecnologías extensivas se basan en la imitación de los procesos de depuración que ocurren naturalmente en los suelos y en los cuerpos de agua, y para lo cual requieren una gran superficie. Hay un tercer bloque, entre los dos anteriores que lo constituyen aquellas tecnologías que se encuentran en una situación intermedia tanto en relación con la cantidad de equipos electromecánicos que utilizan como en relación con la energía que consumen.

A continuación, se enumeran las distintas tecnologías que actualmente se aplican mayoritariamente para depurar las aguas residuales de pequeñas aglomeraciones urbanas, así como dos procesos de tratamiento primario de común utilización:

Tratamientos primarios: fosas sépticas y tanques Imhoff

Tecnologías extensivas:

- a) Las que recurren al empleo del suelo como elemento depurador:
 - Sistemas de aplicación subsuperficial: Zanjas Filtrantes, Lechos Filtrantes, Pozos Filtrantes
 - Sistemas de aplicación superficial: *Filtros Verdes*
- b) Las que simulan las condiciones propias de los humedales naturales:
 - *Humedales Artificiales*, en sus distintas modalidades: Flujo Superficial y Flujo Subsuperficial (Vertical y Horizontal)
- c) Las que imitan los procesos naturales de depuración que se dan en ríos y lagos
 - Lagunajes
- d) Las que se basan en la filtración de las aguas a tratar a través de un carbón natural
 - Filtros de Turba

Tecnologías intensivas:

- Aireación Prolongada

Dentro de las tecnologías intensivas también es importante mencionar otras tecnologías emergentes, que se están empezando a emplear en poblaciones de pequeña entidad (< 5.000 h.e.) como son los reactores secuenciales de fangos activos y la tecnología de biomasa fija sobre lecho móvil, ya sea separada (MBBR) o combinada con los fangos activos (IFAS).

Tecnologías intermedias:

- Lechos Bacterianos
- Contactores Biológicos Rotativos (CBR)

Todas estas tecnologías pueden ser aplicadas tanto en sistemas centralizados de depuración como sistemas descentralizados o *in situ*, si bien determinadas tecnologías son más apropiadas para uno u otro caso.

Es precisamente sobre una de las tecnologías enunciadas, concretamente la de Humedales Artificiales, sobre la que se centra la investigación objeto de la presente Memoria de Tesis.

La principal razón para la elección de esta tecnología como eje del estudio ha sido que, aun no siendo la única aplicable, es sin duda la que más grado de implantación está teniendo a nivel internacional.

Es razonable pensar que en el territorio español se siga la misma tendencia que en el resto de los países y suceda por tanto, en pocos años, que los Humedales Artificiales sea la tecnología más extendida en los pequeños núcleos de población.

3 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS: LOS DIFERENTES CONCEPTOS DE HUMEDAL ARTIFICIAL

El concepto del uso de los sistemas de Humedales Artificiales plantados con vegetación propia de los humedales naturales, empezó hace más de 50 años con el trabajo pionero de la Dra. Seidel del Instituto Max-Planck en Alemania. Seidel observó que la anea común (*Schoenoplectus lacustris*) era capaz de reducir gran cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas existentes en el agua contaminada (Brix, 2007a). Por otro lado, observó que determinadas bacterias (*Coliformes*, *Salmonella* y *Enterococos*) desaparecían pasando a través de la plantación de aneas (Seidel, 1964; 1996). Así mismo, los metales pesados e hidrocarburos (fenoles y sus derivados) eran eliminados del agua por las plantas (Seidel, 1996).

A partir de estos resultados se desarrollaron un número de sistemas de ensayo donde se trataban varios tipos de agua residual y sistemas de flujo superficial para el tratamiento de las aguas residuales domésticas (Jong, 1976; Greiner, 1984).

Sin embargo, se puede decir que fue el trabajo del Dr. Kickuth el que realmente estimuló el interés en la tecnología de Humedales Artificiales en Europa (Kickuth, 1970, 1980, 1982). Kickuth desarrolló el tratamiento conocido como *Root Zone Method*, que se basa en los procesos de tratamiento que ocurren en la zona de raíz del carrizo común (*Phragmites australis*) y en el suelo en el que las plantas crecen. Pese al gran impulso dado en esos años, no se terminó de alcanzar una uniformidad en las directrices del diseño (Brix, 1987a, 1987b; Brix, 1989, Brix, 2007b).

En el área Mediterránea se han desarrollado numerosas experiencias con éxito, destacándose los trabajos llevadas a cabo en: Francia (Lesavre, 2002; Liénard, 1995; Molle, 2004; Paing, 2004), España (García, 2004; Salas, 2007), Portugal (Matos, 2002), Marruecos (Mandi, 1996; El Hamouri, 2007), Italia (Conte, 2001; Masi, 2000 y 2007), Egipto (Awad, 2001; Higgins, 2001), Israel (Brenner, 2002), Eslovenia (Bulc, 2002; Bulc, 2003), Croacia (Shalabi, 2004), Grecia (Papadopoulos, 2002), Turquía (Yildiz, 2004). Así mismo, se han conseguido resultados interesantes en países fríos como Canadá, Suecia, Noruega, Dinamarca, Letonia y Lituania. Se puede decir que los Humedales Artificiales son sin duda sistemas de tratamiento eficientes,

adaptables, asequibles e higiénicos para el tratamiento de varios tipos de aguas residuales. (Masi, 2007).

Existe una relación estrecha entre los rendimientos y las condiciones climáticas locales. En general, los Humedales Artificiales de climas templados y tropicales muestran mejores resultados en comparación con las experiencias llevadas a cabo en países más fríos. Sin embargo, en los países de climas más cálidos, cuando existe también el objetivo de reutilización del efluente final, uno de los principales problemas es la alta tasa de evapotranspiración (Masi, 2007).

Durante los años 70 y 80 la principal utilización de los Humedales Artificiales fue como estaciones de depuración de aguas residuales urbanas (Hammer, 1989; Moshiri, 1993; Kadlec, 1996; Vymazal, 1998). En algunos casos se han utilizado como tratamiento terciario, combinándolos con sistemas de tecnología convencional (Kinght, 1987; Kadlec, 1996; Toet, 2005). Pero es a partir de la década de los 90 cuando los Humedales Artificiales, además de los usos mencionados, se han utilizado con éxito en el tratamiento de distintas aguas residuales industriales (Tanner, 1994; Chen, 2006; Hadad, 2006); lixiviados de vertedero (Nivala, 2007) y aguas de escorrentía tanto urbana como agrícola (Lee, 2007).

3.1 Conceptos y fundamentos

Los Humedales Artificiales son zonas construidas por el hombre en las que, de forma controlada, se reproducen los procesos de eliminación de contaminantes que se dan en los humedales naturales.

El carácter artificial de este tipo de humedales viene definido por las siguientes particularidades:

- El confinamiento del humedal se construye mecánicamente y se impermeabiliza para evitar pérdidas de agua al subsuelo
- Se recurre al empleo de sustratos diferentes del terreno original para el enraizamiento de las plantas

- Se seleccionan las plantas que van a colonizar el humedal

La depuración de las aguas residuales se consigue haciéndolas pasar a través de zonas húmedas artificiales, en las que tienen lugar procesos físicos, biológicos y químicos, que da lugar a unos efluentes finales depurados.

La tecnología de Humedales Artificiales puede ser considerada como un ecosistema complejo, en el que los principales actores son:

- El sustrato: que sirve de soporte a la vegetación, permitiendo la fijación de la población microbiana (en forma de biopelícula), que va a participar en la mayoría de los procesos de eliminación de los contaminantes presentes en las aguas.
- La vegetación (macrófitas): que contribuye a la oxigenación del sustrato, a la eliminación de nutrientes y sobre la que en su parte subterránea también se desarrolla la biopelícula.
- El agua a tratar: que circula a través del sustrato y de la vegetación.

La vegetación que se emplea en este tipo de humedales es la misma que coloniza los humedales naturales, plantas acuáticas emergentes (carrizos, juncos, aneas, etc.), especies anfíbias que se desarrollan en aguas poco profundas, arraigadas al subsuelo.

Este tipo de vegetación presenta una elevada productividad (50-70 toneladas de materia seca/ha.año) y tolera las condiciones de falta de oxígeno, que se producen en suelos encharcados, al contar con canales o zonas de aireación (aerénquima), que facilitan el paso del oxígeno (producido por fotosíntesis en las hojas), hasta la zona radicular.

3.2 Clasificación de los Humedales Artificiales

Respecto a la clasificación de los Humedales Artificiales, éstos se pueden clasificar de acuerdo a la forma de vida de las plantas dominantes que están creciendo en los sistemas, en (Brix. 2007):

- Sistemas basados en los macrófitos flotantes libres.
- Sistemas basados en macrófitos emergentes enraizados.
- Sistemas basados en macrófitos sumergidos (Brix, 1989)

Los sistemas más prometedores son los plantados con plantas emergentes enraizadas, pero sus diseños varían en términos del sustrato utilizado y del régimen de caudal circulante.

Dentro de la modalidad de sistemas basados en plantas enraizadas, la clasificación más extendida es la que se basa en la forma de circulación del agua a tratar. Los dos grandes grupos según esta categoría son:

- o Humedales Artificiales de Flujo Superficial
- o Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial

3.3 Humedales Artificiales de Flujo Superficial

Los Humedales Artificiales de Flujo Superficial (también conocidos como Humedales de Flujo Libre) están inundados y exponen la superficie del agua a la atmósfera. La profundidad del agua en estos sistemas suele ser de 30-40 cm y el proceso de tratamiento está favorecido por la presencia de las partes sumergidas de las plantas como un sustrato para el crecimiento microbiano adjunto. Como ejemplo, se puede indicar que en zonas como Norte América el tipo de Humedales Artificiales dominantes son los de Flujo Superficial.

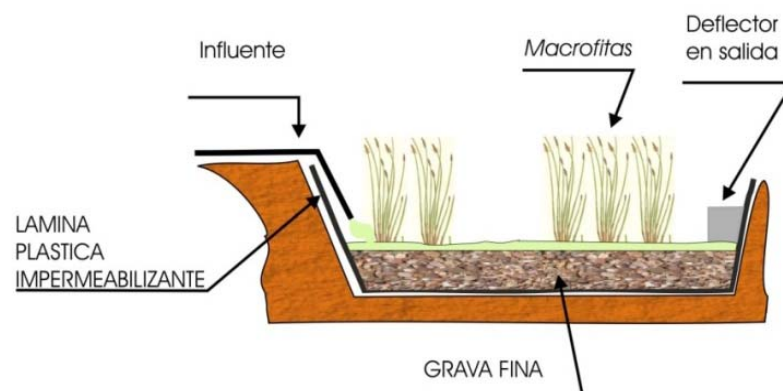


Figura 4. Corte longitudinal de un Humedal Artificial de Flujo Superficial (Martín, 2007)

Los Humedales Artificiales de Flujo Superficial suelen ser instalaciones de varias hectáreas, que principalmente tratan efluentes procedentes de tratamientos secundarios, y que también se emplean para crear y restaurar ecosistemas acuáticos.

La alimentación a estos humedales se efectúa de forma continua y la depuración tiene lugar en el tránsito de las aguas a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente implantada. Tallos, raíces y hojas caídas sirven de soporte para la fijación de la película bacteriana responsable de los procesos de biodegradación, mientras que las hojas que están por encima de la superficie del agua dan sombra a la masa de agua, limitando el crecimiento de microalgas.

3.4 Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial

Los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial por lo general son instalaciones de menor tamaño que los de Flujo Superficial, y que en la mayoría de los casos se emplean para el tratamiento de las aguas residuales generadas en núcleos de población de menos de 2.000 habitantes.

Este tipo de humedales presenta ciertas ventajas con respecto a los de Flujo Superficial, al necesitar menos superficie de terreno para su ubicación y evitar los problemas de aparición de olores y de mosquitos, dado que el agua circula subsuperficialmente. Igualmente, presentan un bajo riesgo de exposición directa a las personas y una mejor respuesta ante los descensos de la temperatura ambiente. Así por ejemplo se ha observado (García, 2003) que en un humedal sin plantar el gradiente térmico en verano puede llegar hasta 12°C/m, mientras que en uno plantado es de 3,4 °C/m.

Como desventajas cabe citar su mayor coste constructivo, motivado principalmente por el coste de adquisición y colocación del sustrato filtrante, y los mayores riegos de colmatación de dicho sustrato. El coste se puede incrementar hasta un 30% como consecuencia del material granular (Collado, 2000). También es de señalar el menor valor ambiental del subsuperficial por su difícil accesibilidad para la fauna salvaje.

Según la dirección en la que circulan las aguas a través del sustrato, los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial se clasifican en:

- Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficiales Horizontales
- Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficiales Verticales

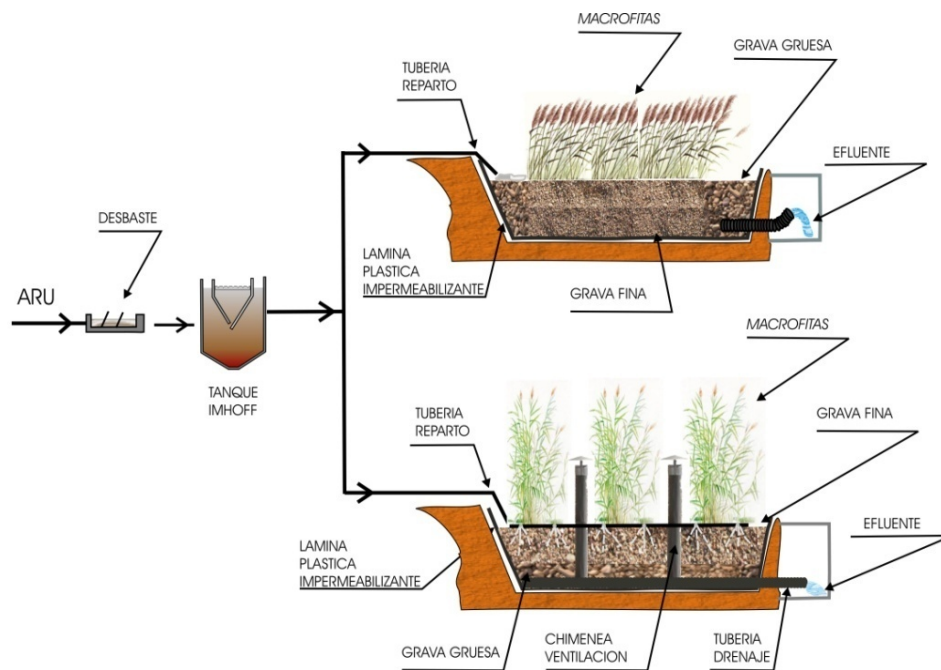


Figura 5. Cortes longitudinales de Humedales A. de Flujo Subsuperficial Horizontal y Vertical (Martín, 2007)

3.4.1 Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal

En los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal la alimentación se efectúa de forma continua, estando permanentemente inundados, atravesando las aguas horizontalmente un sustrato filtrante de gravilla-grava, de unos 0,3 a 0,6 m de espesor, en el que se fija la vegetación. Hay algunas experiencias que muestran buenos resultados de estos humedales con funcionamiento intermitente (Vymazal, 2003).

A la salida de los humedales, una tubería flexible permite controlar el nivel de encharcamiento, que suele mantenerse unos 5 cm por debajo del nivel de los áridos, lo que impide que las aguas sean visibles.

Los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal operan con tiempos de retención hidráulica de varios días. En este tipo de humedales, el proceso de tratamiento ocurre en la zona de la raíz y en la superficie de la arena, grava o gravilla utilizada como sustrato en el lecho.

Los efluentes obtenidos presentan mayor o menor ausencia de oxígeno y potencial redox más o menos negativo según la carga orgánica que se le aplique y la profundidad de la lámina de agua (trabajar con 30 cm en vez de los 60 cm habitualmente recomendados) (García, 2004). Con cargas habituales de 4-6 g DBO₅/m² .d, los efluentes presentan ausencia de oxígeno y potencial redox de hasta -100 mV (Huang, 2004).

En Europa existen cientos de sistemas de Flujo Horizontal que operan, principalmente, para el tratamiento de las aguas residuales domésticas (Vymazal, 1998; 2008), y en la actualidad se siguen extendiendo a gran velocidad, especialmente en los países mediterráneos. La mayoría de los sistemas están plantados con el carrizo común (*Phragmites australis*), aunque se han incluido otras especies propias de humedales naturales. Algunos sistemas han presentado problemas de colmatación del sustrato, principalmente como consecuencia de un insuficiente pretratamiento del agua residual. Numerosos autores (Puigagut, 2007; Pedescol, 2007) manifiestan, precisamente, que uno de los grandes inconvenientes de este tipo de sistemas horizontales es el fenómeno de colmatación del medio, siendo descrito como la principal causa de reducción, tanto en la eficiencia del tratamiento, como en el periodo de vida del sistema.

Existen diversos estudios para determinar la biodegradabilidad aerobia y anaerobia de los sólidos atrapados en el sustrato del Humedal Artificial Horizontal. A partir de dichos estudios se determina que el fango retenido en la sección inicial del humedal es más fácil de biodegradar que el retenido en la sección final del sistema, tanto por las vía aerobia como anaerobia. (Puigagut, 2007).

Así mismo, otros estudios proponen medidas indirectas para evaluar el grado de colmatación de estos sistemas (Pedescol, 2007). Entre estas medidas se contemplan la realización de un análisis gráfico de la conductividad hidráulica, cuantificación de los sólidos (totales y volátiles) asociados al medio granular, análisis de la biomasa radicular, así como el análisis de la composición mineral de la grava original, de la grava mojada y de los sólidos orgánicos retenidos en el medio granular.

3.4.2 Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical

En los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical la alimentación se efectúa de forma intermitente, para lo que se recurre generalmente al empleo de sifones de descarga controlada. Las aguas circulan verticalmente a través de un sustrato filtrante de arena-gravilla, de aproximadamente 1 m de espesor, en el que se fija la vegetación. En el fondo de los humedales una red de drenaje permite la recogida de los efluentes depurados. A esta red de drenaje se conectan un conjunto de chimeneas, que sobresalen de la capa de áridos, al objeto de incrementar la oxigenación del sustrato filtrante.

Este tipo de humedales operan con tiempos de retención hidráulica tan sólo de unas horas, y con cargas superficiales orgánicas superiores a las que se emplean en los Horizontales, entre los 20 y 40 g DBO₅/m².día (Cooper, 2003), y generando efluentes con un mayor grado de oxigenación (valores de concentración de oxígeno de más de 9 mg/l, cercanos al 90% de saturación) (Martí, 2003).

Los sistemas de flujo vertical presentan mejores rendimientos en el tratamiento, respecto a la reducción de DBO₅ y nitrificación, debido al mejor potencial de aireación de estos sistemas comparados con los de flujo horizontal, así como a su mejor control hidráulico (Bahlo, 1990; Cooper, 1999; Cooper, 2004). De ahí que en las pasadas dos décadas el enfoque haya estado en el desarrollo de los sistemas compactos de flujo vertical para el tratamiento de las aguas residuales domésticas y se hayan elaborado guías de diseño en numerosos países (Brix, 2005).

Aunque, como se ha comentado, los Humedales Artificiales de Flujo Vertical son bastante efectivos en la reducción de SST y DBO₅, produciéndose además en ciertos casos nitrificación, la reducción de fósforo en este tipo de sistemas es deficiente y restringido a la vinculación limitante que existe en el medio arena o grava (Brix, 2007). Por esta razón, los últimos desarrollos en el campo de los Humedales Artificiales de Flujo Vertical se han centrado también en la reducción de fósforo de forma eficiente.

Para conseguir una mayor reducción de fósforo, se han creado los sistemas de flujo vertical con recirculación y reducción química de fósforo. Estos sistemas, consisten en lechos de 1 m de

profundidad rellenos de arena y plantados con *Phragmites australis*, con una superficie de unos 3 m²/h.e. El efluente del tanque de sedimentación es enviado por pulsos a la superficie del lecho y distribuido de forma homogénea por medio de tuberías a presión. El agua percola a través del lecho insaturado y es recogida por tuberías de drenaje situadas en el fondo y evacuada finalmente del lecho. Una fracción del efluente se recircula tanto al tanque de sedimentación como al pozo de bombeo con el objeto de aumentar la desnitrificación y estabilizar el rendimiento (Arias, 2005). En el tanque de sedimentación (pretratamiento) está instalado un sistema de dosificación para la precipitación del fósforo. El sistema de dosificación consiste en una bomba airlift instalada en el tanque de sedimentación, donde se añade un coagulante comercial (PAX 14). El fósforo precipita en el tanque de sedimentación y allí permanece hasta la limpieza anual del mismo.

Las experiencias iniciales han mostrado que la recirculación en estos sistemas mejora y estabiliza de forma significativa los rendimientos y el sistema simple de dosificación química en el tanque de sedimentación puede mantener bajas las concentraciones de fósforo en el efluente.

3.4.3 Otras modalidades de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical

Otro tipo de sistemas de flujo vertical son los de doble etapa con tratamiento integrado de fangos. El material de filtración poroso de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial puede colmatarse fácilmente por partículas y por lo tanto el agua residual tiene que estar pretratada mecánicamente antes de introducirla en los lechos, con el objeto de eliminar la mayor cantidad de partículas. Sin embargo, en la última década los Humedales Artificiales de Flujo Vertical con doble etapa para el tratamiento de las aguas residuales brutas se han ido introduciendo y aplicando con éxito, especialmente en Francia (Molle, 2005; Molle, 2006; Esser, 2007).

En la primera etapa tiene lugar el tratamiento de fangos y en parte la reducción de la materia orgánica; en la segunda etapa se produce la reducción de la materia orgánica final y la nitrificación. Cada etapa tiene lechos de filtración que operan de forma paralela (bajo condiciones normales, 3 lechos en la primera etapa y 2 en la segunda).

Cada lecho de la etapa primaria recibe toda la carga orgánica durante la fase de alimentación, que a menudo dura de 3 a 4 días, habiendo estado en reposo anteriormente por el doble de tiempo. Las fases alternantes de alimentación y reposo son fundamentales para controlar el crecimiento de la biomasa adherida al medio filtrante, para el mantenimiento de las condiciones aerobias dentro del lecho y para mineralizar los depósitos orgánicos resultantes de los sólidos en suspensión, existentes en el agua residual bruta. Después de la retención de fangos y compuestos orgánicos, el filtrado se envía a la segunda etapa con el objeto de completar el tratamiento y, en particular, la nitrificación.

Otro tipo de humedales artificiales son los sistemas evapotranspirativos. En Dinamarca se ha desarrollado un sistema evapotranspirativo (ET) donde se utilizan sauces para tratar el agua residual y reciclar los nutrientes en hogares aislados y lugares donde los estándares para el efluente son estrictos y la infiltración en el suelo no es posible. Uno de los aspectos más importantes de este sistema (ET) es su capacidad para evapotranspirar el agua residual descargada en los sistemas, así como el agua de lluvia que cae a los mismos.

Los ET son sistemas con descarga cero del agua y parte de los nutrientes pueden ser reciclados en la biomasa de los sauces. Los sauces tienen una pérdida de agua unas 2,5 veces mayor que la tasa de evapotranspiración potencial debido a factores como el efecto “tendedero”, donde la altura de la vegetación es mayor que la de los alrededores (Allen, 1998). El transporte del calor sensible en la cubierta forestal y del vapor de agua fuera de la cubierta se incrementa por el viento, que pasa horizontalmente a través de la vegetación.

El sistema consiste en un lecho profundo recubierto de polietileno de alta densidad con tierra y plantado con clones de alta producción del sauce (*Salix viminalis* L.). El total de superficie necesaria depende de la cantidad y calidad del agua a tratar y de la lluvia anual en la zona. La precipitación anual del lugar en el que se va a construir el sistema es, por tanto, un parámetro de dimensionamiento importante.

El agua decantada se introduce subterráneamente dentro del lecho bajo presión. El lecho está rodeado con una membrana y el agua residual se distribuye subterráneamente por una bomba

de nivel. En el fondo del lecho existe una tubería de drenaje que puede ser utilizada para vaciar el agua del lecho si después de varios años existen acumulaciones de sal.

Otro tipo de sistemas relacionados con los Humedales Artificiales son los de multifunción o multietapas. Después del tsunami sufrido por Tailandia, en enero de 2005 el gobierno danés participó en el restablecimiento de los servicios de gestión de aguas residuales en algunas de las áreas afectadas, mediante el desarrollo de sistemas de tratamiento y recogida de las aguas residuales (Brix, 2007a). El proyecto se desarrolló en la isla de Phi Phi Don (3.000-4.000 residentes permanentes y 1.2 millones de turistas al año). La parcela en la que se ubica el sistema tiene unos 6.000 m². La capacidad de tratamiento de la planta es de 400 m³/d. Desde el aire, el sistema se asemeja a una mariposa gigante revoloteando cerca de una flor. Además, en los humedales se han plantado flores como *Canna* y *Heliconia* para hacerlos estéticamente atractivos.

El sistema incorpora control de olores (la reducción de olor se lleva a cabo mediante el uso de carbón vegetal y madera cortada). La estación de bombeo está construida bajo tierra y las unidades del tratamiento primario (desbaste, desarenado y desengrasado y la bomba de residuos) se encuentran dentro de la caseta de bombeo.

El diseño del sistema es el siguiente:

- Cada residencia individual o comercio presentan tanques sépticos que reciben las aguas negras. Desde aquí el agua residual entra en un sistema de recogida separativo, que conecta con la estación de bombeo. Par reducir mantenimiento y minimizar costes de operación, las bombas funcionan con energía solar. Las bombas envían el agua residual a tres sifones elevados (centro de la flor).
- Desde los sifones se distribuye el agua residual a tres Humedales Artificiales de Flujo Vertical (primer pétalo de la flor), donde se filtra a través de filtros de grava.
- Mediante tuberías, el agua se envía a tres Humedales Artificiales de Flujo Horizontal (segundo pétalo de la flor).
- Posteriormente, el agua residual se conduce a tres Humedales de Flujo Superficial (alas de la mariposa).
- Finalmente, el agua es enviada a lagunas de tratamiento final (cuerpo de la mariposa).

- El efluente es acumulado en tanques de almacenamiento. El efluente tratado es reutilizado como agua de riego, dada la gran demanda existente en la isla.

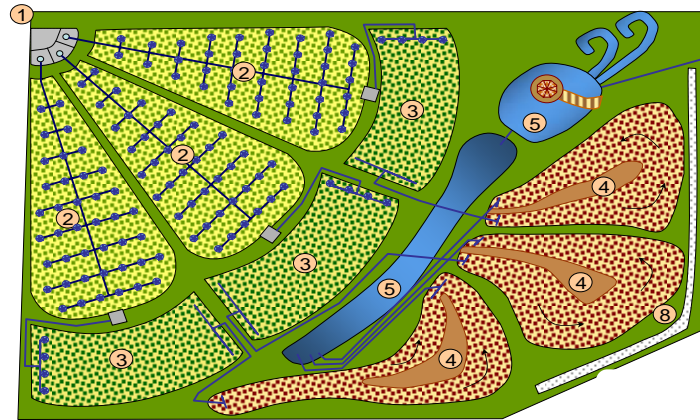


Figura 6. Esquema del sistema de depuración "mariposa" en Koh Phi Phi Don (Brix, 2007,a)

Respecto a la combinación de los Humedales Artificiales existen autores que consideran que las mejores combinaciones son de Flujo Subsuperficial Horizontal y Vertical, llamados sistemas híbridos. Con estas configuraciones el área necesaria se puede reducir a menos de 2 m²/h.e y usando el de flujo horizontal como primera etapa seguido del vertical, para el tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, se pueden obtener cantidades importantes de nitratos en la salida (Masi, 2007).

Concretamente el sistema estudiado por este autor consiste en un tratamiento primario (tanque Imhoff) desde donde el agua se envía a 2 Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal en paralelo, actuando como tratamiento secundario (1ª etapa). Posteriormente, el agua pasa a varios Humedales Verticales en paralelo (2ª etapa) y posteriormente a 2 Humedales Horizontales en paralelo (3ª etapa). Finalmente el agua pasa a un sistema de flujo libre que funciona como tratamiento terciario (4ª etapa). En la creación de la planta se ha tenido como objetivo crear un área con gran biodiversidad (se han plantado 16 especies vegetales autóctonas).

Existen países como la República Checa, donde a finales del 2006 unos 180 Humedales Artificiales estaban operativos. La mayoría de los humedales se diseñaron para tratar aguas residuales domésticas o municipales, aunque se incluyeron otros usos como el tratamiento de las escorrentías de las tormentas, lecherías, mataderos, panaderías y granjas caprinas

(Vymazal, 2006). Los tamaños varían desde pequeños sistemas para casas individuales (< 10 h. e.) a 1.400 h. e. (Vymazal, 2007).

Existen diversos estudios que demuestran que los valores, en cuanto a la reducción de microorganismos en los Humedales Artificiales, generalmente son mayores que en los sistemas convencionales (García, 2003; Hench, 2003; Ansola, 2003). Sin embargo, las concentraciones obtenidas no cumplen con los valores establecidos por directivas europeas sobre descargas a zonas de baño o cuerpos de agua con reutilización para agricultura, por lo que se hace necesaria una mayor desinfección, proponiendo métodos como la desinfección con UV. (Galvao, 2007).

Los Humedales Artificiales se pueden utilizar también para mejorar la calidad de otros medios acuáticos naturales. Tal es el caso del estudio llevado a cabo A. Rivas (2007), en el Lago Pátzcuaro, uno de los más importantes de México y que padece problemas de eutrofización causados principalmente por los vertidos de aguas residuales. También hay quien los presentan como auténticos jardines verdes, totalmente integrados en las pequeñas colectividades y con altos rendimientos de depuración (Nelson, 2007).

También se habla de los Humedales Artificiales como Sistemas de Depuración Natural (SDN) (Vera, 2007) dado que no se consideran que sean meros artefactos para tratar el agua residual, siendo desvinculados de otras consideraciones ambientales. Los SDN son concebidos como sistemas complejos de implementación de la integración social, ambiental y económica, lo cual permitiría la unión entre las actividades generadas de las aguas residuales, las personas de la zona, el medio ambiente local y la valoración de subproductos generados a partir de estos sistemas de tratamiento de aguas residuales.

3.5 Esquemas típicos de funcionamiento

3.5.1 Humedales Artificiales de Flujo Superficial

Los Humedales Artificiales de Flujo Superficial suelen ubicarse a continuación de estaciones de depuración en las que se llegan hasta un nivel de tratamiento secundario.

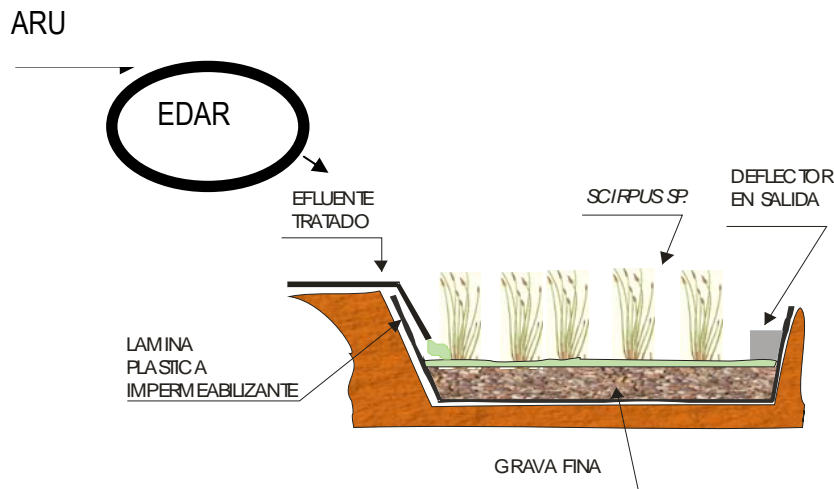


Figura 7. Esquema de funcionamiento de un Humedal de Flujo Superficial

3.5.2 Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial

En este tipo de humedales el esquema de funcionamiento es, en esencia, semejante al de un tratamiento convencional, constando de Pretratamiento, Tratamiento Primario, Tratamiento Secundario y, opcionalmente, Tratamiento Terciario.

3.5.2.1 Pretratamiento

Tiene como objetivo la eliminación de los objetos gruesos y de las grasas y flotantes que se encuentran en las aguas residuales, dado que su presencia en el resto de etapas del tratamiento podría provocar problemas de obturaciones en las conducciones y la rápida colmatación del sustrato filtrante de los humedales.

Normalmente, el Pretratamiento en la tecnología de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial está constituido exclusivamente por un desbaste de gruesos. La eliminación de sólidos gruesos suele llevarse a cabo haciendo pasar las aguas residuales a través de rejillas de desbaste, de 2-3 cm de separación entre barrotes, y de limpieza manual

3.5.2.2 Tratamiento Primario

Para conseguir una mayor eliminación de los sólidos en suspensión presentes en las aguas residuales a tratar, y minimizar por tanto los riesgos de colmatación del sustrato filtrante, se recurre a la implantación de fosas sépticas o tanques Imhoff, como paso previo a la alimentación a los humedales.

Las fosas sépticas son dispositivos enterrados en los que decanta la materia sedimentable presente en las aguas residuales. La fracción orgánica de esta materia sedimentada experimenta reacciones de degradación anaerobia, mineralizándose paulatinamente.

Estos dispositivos se encuentran compartimentados, siendo la disposición más común la de dos compartimentos dispuestos en serie. Al llegar el agua al primer compartimento, la materia particulada más densa sedimenta y se deposita en el fondo en forma de lodo, mientras que la materia particulada más ligera forma una costra en la superficie. El agua clarificada pasa al segundo compartimento a través de un orificio practicado en la pared de separación y situado por debajo del nivel líquido. En este segundo compartimento tiene lugar también una sedimentación de sólidos y formación de costra, como consecuencia de los materiales que escapan de la etapa anterior, pero en menor cuantía.

Los lodos retenidos en el fondo de los distintos compartimentos experimentan reacciones de degradación anaerobia, mineralizándose y reduciendo su volumen, lo que permite que las fosas funcionen durante largos períodos de tiempo sin necesidad de purgar el excedente de lodos.

Las burbujas de gas que se producen en la degradación anaerobia de los lodos decantados obstaculizan la normal sedimentación de los sólidos presentes en las aguas residuales influentes. Es por ello, por lo que se dispone un segundo compartimento, en el que las partículas más ligeras encuentran condiciones de sedimentación más favorables.

Los tanques Imhoff constan de un único depósito, en el que se separan la zona de sedimentación, que se sitúa en la parte superior, de la de digestión de los sólidos decantados, que se ubica en la zona inferior del depósito. La configuración de la apertura que comunica

ambas zonas impide el paso de gases y partículas de fango de la zona de digestión a la de decantación, de esta forma se evita que los gases que se generan en la digestión afecten a la decantación de los sólidos en suspensión sedimentables. Para minimizar los riesgos de colmatación del sustrato filtrante, en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial es de vital importancia el correcto dimensionamiento y operación de los elementos constitutivos del Tratamiento Primario.

3.5.2.3 Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario está constituido por los propios Humedales Artificiales, que se alimentan con los efluentes procedentes de las fosas sépticas o de los tanques Imhoff.

3.5.2.4 Tratamiento Terciario

En ocasiones, se someten a los efluentes de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial a una etapa de afino en Lagunas de Maduración, para mejorar, principalmente, el grado de abatimiento de los organismos patógenos. Esta eliminación se produce, fundamentalmente, por la acción de la radiación ultravioleta de la luz solar.

3.6 Mecanismos de depuración

Los mecanismos involucrados en la eliminación de los principales contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas, mediante el empleo de Humedales Artificiales se explican en los apartados siguientes.

3.6.1 Eliminación de sólidos en suspensión

Los mecanismos que intervienen en la eliminación de la materia en suspensión en los Humedales Artificiales son:

- Sedimentación: la materia en suspensión sedimentable (principalmente de naturaleza orgánica), presente en las aguas a tratar, decanta exclusivamente por la acción de la gravedad.
- Floculación: permite la sedimentación de partículas de pequeño tamaño, o de menor densidad que el agua, al producirse agregados de las mismas que ya si cuentan con capacidad para decantar.
- Filtración: la retención de la materia en suspensión tiene lugar al pasar las aguas a través del conjunto que forman el sustrato y los rizomas, raíces y tallos de la vegetación.

En el caso de los Humedales Artificiales de Flujo Superficial, la eliminación de la materia en suspensión se debe, principalmente, a fenómenos de sedimentación y de filtración de las aguas a su paso por toda la masa de tallos y de los restos de vegetación caídos al agua. En este tipo de humedales, para conseguir elevados rendimientos de sólidos en suspensión, se requiere disponer de zonas de vegetación abundante, que faciliten la sedimentación (al disminuir la velocidad de paso de las aguas) y la filtración, a la vez que, por el efecto sombra, se evita el crecimiento excesivo de microalgas, que como en el caso de los Lagunajes podría incrementar los contenidos en materia en suspensión de los efluentes finales.

Para la evaluación de la eliminación de materia en suspensión en los Humedales Artificiales de Flujo Superficial, Reed y colaboradores proponen la siguiente expresión (Reed, 1995):

Ecuación 1. Cálculo de los SST en el efluente de Humedales de Flujo Superficial

$$SS_e = SS_i \times (0,1139 + 0,00213 \times CHS)$$

Donde:

SS_e: concentración de sólidos en suspensión en el efluente (mg/l)

SS_i: concentración de sólidos en suspensión en el influente (mg/l)

CHS: carga hidráulica superficial (cm/d), que se calcula haciendo uso de la expresión siguiente:

Ecuación 2. Cálculo de la Carga Hidráulica Superficial

$$CHS = 100 \times Q/S$$

Q: caudal del influente (m³/d)

S: superficie del humedal (m²)

En los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial, la eliminación de la materia suspensión tiene lugar, principalmente, por fenómenos de filtración a través del conjunto que forman el sustrato (sobre el que crecen las plantas), los rizomas y las raíces. Teniendo lugar el mayor porcentaje de eliminación de partículas en suspensión en la zona de entrada a los humedales (Cooper, 1996).

Esta retención de la materia en suspensión se da por tres motivos: la baja velocidad del agua, las fuerzas de adhesión entre partículas y las constricciones del flujo producidas tanto por el medio granular como por el entramado de raíces y rizomas. Son por tanto un conjunto de mecanismos físicos los que contribuyen a la eliminación de los sólidos en suspensión (Kadlec, 1996). Algunos estudios (Tanner, 1998) han demostrado que hay una acumulación neta de sólidos recalcitrantes a largo plazo. Esto supone, que incluso bien diseñados, no se puede predecir la vida útil media de este tipo de instalaciones.

Para la evaluación de la eliminación de la materia en suspensión en los Humedales de Flujo Subsuperficial, Reed y col. proponen la expresión (Reed, 1995):

Ecuación 3. Cálculo de los SST en el efluente de Humedales de Flujo Subsuperficial

$$SS_e = SS_i \times (0,1058 + 0,0011 \times CHS)$$

Donde:

SS_e: concentración de sólidos en suspensión en el efluente (mg/l)

SS_i: concentración de sólidos en suspensión en el influente (mg/l)

CHS: carga hidráulica superficial (cm/d), que se calcula haciendo uso de la Ecuación 2

Los Humedales de Flujo Subsuperficial bien diseñados son muy eficientes para eliminar sólidos en suspensión (Cooper, 1996). Los valores habituales de eliminación se encuentran en el intervalo 85-95%.

Los sólidos de naturaleza orgánica retenidos en el sustrato experimentan reacciones de biodegradación, que se aceleran en los momentos del año de temperaturas más elevadas. Esta degradación supone una fuente interna de materia orgánica disuelta, lo que podría explicar el

porqué los Humedales de Flujo Subsuperficial no presentan en época veraniega rendimientos más elevados de eliminación de materia orgánica que los que se logran en el periodo invernal.

Para evitar la rápida colmatación de los sustratos filtrantes se hace imprescindible la existencia previa de un Pretratamiento y de un Tratamiento Primario, que eliminen un elevado porcentaje de la materia en suspensión presente en las aguas residuales a tratar.

En la actualidad, se comienza a trabajar combinando Filtros de Turba y Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial, prescindiendo del Tratamiento Primario mediante fosas sépticas o tanques Imhoff. Los elevados rendimientos de eliminación de sólidos en suspensión que se alcanzan en los Filtros de Turba (del orden del 90%), y la facilidad de manejo de los subproductos generados, costras secas en lugar de lodos líquidos, auguran un buen futuro para esta combinación de Tecnologías no Convencionales (Salas, 2007).

3.6.2 Eliminación de materia orgánica

La materia orgánica, presente en forma de materia en suspensión sedimentable, irá decantando paulatinamente en los humedales y experimentará procesos de degradación biológica. Igualmente, parte de la materia orgánica presente en forma particulada quedará retenida por filtración, al pasar las aguas por el entramado sustrato filtrante-raíces-tallos.

La eliminación de materia orgánica por las dos vías descritas transcurre de forma rápida, y en el caso de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial casi la mitad de la DBO_5 se elimina al pasar las aguas por los primeros metros del humedal.

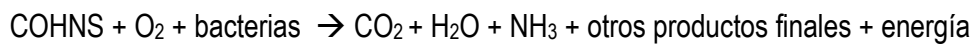
Sobre la materia orgánica disuelta, al igual que sobre la particulada, actúan los microorganismos presentes en el humedal, principalmente bacterias, que utilizarán esta materia orgánica a modo de sustrato.

De cualquier manera los procesos físicos, químicos y microbiológicos responsables de la eliminación de la materia orgánica pueden variar en el tiempo y en el espacio, y además,

dependen de muchos factores tales como la carga orgánica, la profundidad del agua y la disponibilidad de aceptores de electrones (García, 2004).

En las distintas modalidades de Humedales Artificiales se dan zonas con presencia o ausencia de oxígeno molecular, por lo que la acción de las bacterias sobre la materia orgánica tiene lugar tanto a través de procesos biológicos aerobios como anaerobios. En el caso de los procesos de degradación aerobios, una fracción de la materia orgánica es oxidada por la flora bacteriana, que obtiene de esta forma la energía necesaria para su mantenimiento celular.

Oxidación



Donde COHNS representa los elementos predominantes en la materia orgánica presente en las aguas residuales. De forma simultánea, otra fracción de materia orgánica se convierte en nuevo tejido celular (síntesis), empleándose para ello la energía liberada en la fase de oxidación.

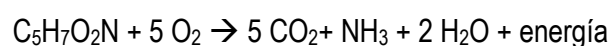
Síntesis



Donde $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$ representa la composición media de los microorganismos encargados de la biodegradación de la materia orgánica.

Finalmente, una vez que disminuye la materia orgánica disponible, las nuevas bacterias comienzan a consumir su propio tejido celular, con el fin de obtener energía para su mantenimiento. Este tercer proceso se conoce como respiración endógena.

Respiración endógena



El aporte de oxígeno para el mantenimiento de las reacciones de oxidación, síntesis y respiración endógena, transcurre de forma diferente en función de la modalidad de Humedal Artificial de que se trate.

En los Humedales Artificiales de Flujo Superficial la principal fuente de aportación de oxígeno a la masa líquida viene representada por los fenómenos de reaeración superficial, provocados por el viento. Estos fenómenos se ven minimizados cuando la vegetación del humedal presenta una elevada densidad. Algo similar ocurre en el aporte de oxígeno, vía fotosíntesis, a través las microalgas que se desarrollan en la masa líquida, y que queda reducido por el efecto sombra que ejercen las vegetaciones de alta densidad, lo que dificulta el desarrollo de estos organismos fotosintéticos.

En este tipo de humedales, la aportación de oxígeno por las propias plantas acuáticas tiene una menor importancia, dada que la zona donde éste se libera (rizomas y raíces), se encuentra dentro del propio sustrato, por debajo de la columna de agua, y a que casi todo el oxígeno aportado por las plantas se consume por la demanda existente en los sedimentos presentes en el fondo del humedal. Con frecuencia, la zona aerobia queda limitada a las zonas de aguas abiertas y a una porción superior, bastante limitada, de la columna de agua.

En el caso de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical, la oxigenación del sustrato que actúa como filtro, al que se encuentran adheridas las bacterias en forma de biopelícula, se produce, básicamente, por la intermitencia en la alimentación de la aguas a tratar, y por la propia configuración de este tipo de humedales, que permite, que una vez finalizado un ciclo de alimentación, las aguas discurran en sentido descendente a lo largo del sustrato, volviendo el aire a ocupar los huecos que van quedando libre como consecuencia de este descenso.

La vegetación propia de los Humedales Artificiales (plantas acuáticas emergentes), también contribuyen a la oxigenación, suministrando a través de sus raíces y rizomas parte del oxígeno que es producido por fotosíntesis en las hojas, y que es transportado a lo largo de un canal hueco conocido como aerénquima. Aunque sin bien es cierto que las plantas presentan esta capacidad de transportar oxígeno, la mayor parte del mismo lo utilizan para consumo propio (Brix, 1993).

Existen notables discrepancias en lo referente a las tasas de transferencia oxígeno de los macrófitos, oscilando entre los 0,5-0,6 g O₂/m².d y los 20 g O₂/m².d. Durante las décadas de los 80 y 90 hubo una gran controversia sobre el papel que tenían las plantas en el tratamiento, pero ahora está ampliamente aceptado por la comunidad científica que las plantas sólo tienen influencia notable si se trata de instalaciones que trabajan con baja carga (USEPA, 2000).

En el caso de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal, la presencia de oxígeno es mucho menor, debido a que el medio se encuentra saturado por agua, que desplaza a los gases atmosféricos de los poros, dando lugar a un sustrato anóxico.

En las zonas de los humedales carentes de oxígeno molecular, la degradación de la materia orgánica transcurre vía anaerobia, a lo largo de una serie de etapas concatenadas, en las que los compuestos resultantes de cada etapa sirven como sustrato a la siguiente.

Las etapas de la degradación anaerobia son las siguientes:

- Etapa hidrolítica: los compuestos orgánicos complejos (hidratos de carbono, proteínas, lípidos), son transformados en otros más sencillos (monosacáridos, aminoácidos, ácidos grasos, glicerol), que sirven de sustrato a las bacterias de la siguiente etapa. En esta primera etapa también se produce la solubilización de parte la materia orgánica particulada.
- Etapa acidogénica: los compuestos orgánicos sencillos, generados en la etapa anterior, son transformados en ácidos orgánicos volátiles (acético, propiónico y butírico, fundamentalmente), mediante el concurso de bacterias generadoras de ácidos (acidogénicas, acetogénicas). La capacidad tampón del medio permite mantener los valores de pH próximos a la neutralidad. Dado que los productos que se forman en esta etapa se encuentran muy poco estabilizados con relación a los iniciales, los rendimientos de eliminación de materia orgánica que se alcanzan, expresados como DBO₅ o DQO, son muy bajos.
- Etapa metanogénica: los ácidos orgánicos volátiles, liberados en la etapa acidogénica, son transformados mediante el concurso de bacterias metanogénicas, en biogás, mezcla, principalmente, de metano y anhídrido carbónico.

En esta fase es en la que tiene lugar realmente la reducción del contenido en materia orgánica, al transformarse ésta en biogás, que abandona el sistema.

Esta última etapa es la limitante del proceso global de degradación anaerobia, como consecuencia de que las bacterias metanogénicas (anaerobias estrictas), son las que presentan un metabolismo más lento y son las más sensibles a las condiciones ambientales presentes (pH, temperatura, presencia de tóxicos, etc.).

Se asume, que en los Humedales Artificiales los compuestos orgánicos son degradados de forma simultánea mediante procesos aerobios y anaerobios, siendo difícil cuantificar la proporción en que se producen cada uno de ellos. En unos estudios realizados sobre Humedales de Flujo Horizontal de 30 y 50 cm de profundidad (García, 2004), concluyeron que en los humedales poco profundos la principal vía de degradación es la desnitrificación, seguida de la sulfatoreducción. En cambio, en los humedales profundos predomina mayoritariamente la sulfatoreducción.

3.6.3 Eliminación de nutrientes

Los rendimientos del sistema, en cuanto a eliminación de nutrientes, está relacionada con la variabilidad en la carga de entrada, de forma que los porcentajes de retención de los nutrientes disminuirán con el incremento de la misma (Howard-Williams, 1985; Hammer, 1994; Soto, 2000).

Otro factor que influye en la eficacia de la eliminación de los nutrientes es el estado de estabilización y madurez tanto del sustrato como de la vegetación que conforma el sistema. En este sentido cabría esperar una mayor inmovilización de los nutrientes en aquellas épocas en las que el carrizo estuviera en la etapa de mayor desarrollo, coincidiendo con la primavera y verano.

3.6.3.1 Eliminación del nitrógeno

En las aguas residuales urbanas el nitrógeno puede encontrarse principalmente en forma orgánica y en forma amoniacal, y en mucha menor cuantía como nitritos o nitratos.

Mediante procesos de amonificación, vía enzimática, las fracciones de nitrógeno en forma orgánica se transforman en formas amoniacales, parte de las cuales son asimiladas por los propios microorganismos, que la incorporan a su masa celular.

En los Humedales Artificiales la eliminación del nitrógeno en forma amoniacal transcurre básicamente por dos vías principales:

- Asimilación por las propias plantas del humedal.
- Procesos de nitrificación-desnitrificación.

En el caso de la asimilación del nitrógeno amoniacal por las plantas del humedal, numerosos estudios han concluido que mediante esta asimilación y la posterior siega de las plantas, no se llega a eliminar más allá del 15-20% del nitrógeno amoniacal presente en las aguas a tratar. Si no se procede a la siega y retirada periódica de la vegetación de los humedales, la mayor parte de los nutrientes retenidos volverán a las aguas, a través de procesos de degradación de la biomasa vegetal.

La principal vía de eliminación del nitrógeno amoniacal en los Humedales Artificiales transcurre mediante procesos combinados de nitrificación-desnitrificación (Neely, 1989; Reddy, 1994).

Las formas amoniacales se adsorben de forma temporal sobre las partículas del sustrato filtrante de los Humedales Artificiales y sobre las partículas orgánicas cargadas eléctricamente, mediante mecanismos de intercambio catiónico (Sirivedhin, 2006; Vymazal, 2007).

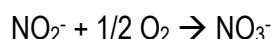
Para liberar este amonio adsorbido, y regenerar los campos de adsorción, se precisa la nitrificación de las formas amoniacales, constituyéndose la nitrificación en el proceso de transformación principal para la reducción de las concentraciones de amonio en los Humedales Artificiales.

La nitrificación es un proceso autotrófico (la energía necesaria para el crecimiento bacteriano se obtiene de la oxidación de compuestos inorgánicos), por el que el nitrógeno amoniacal es transformado en nitrógeno nítrico.

El proceso se desarrolla en dos etapas; en un primer momento bacterias del género *Nitrosomas* oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrógeno nitroso, de acuerdo con la reacción:



Posteriormente, bacterias del género *Nitrobacter* oxidan las formas nitrosas a formas nítricas, de acuerdo con:



Englobando el proceso de nitrificación en una única ecuación se obtiene:



siendo necesarios 4,6 mg de oxígeno para oxidar 1 mg de N-amoniaco y consumiéndose una gran cantidad de alcalinidad (8,6 mg de HCO_3^- por cada mg de N-amoniaco oxidado).

Las bacterias nitrificantes son organismos extremadamente sensibles a gran cantidad de sustancias inhibidoras, tanto orgánicas como inorgánicas, que pueden impedir el crecimiento y la actividad de estos organismos. Las altas concentraciones de amoníaco y de ácido nitroso (HNO_2) pueden resultar inhibidoras, siendo también importante el efecto del pH, cuyo intervalo óptimo es estrecho (7,5 y 8,6).

La temperatura también ejerce una gran influencia sobre el crecimiento de las bacterias nitrificantes y, para que se produzca la nitrificación, es fundamental que existan concentraciones de oxígeno disuelto por encima de 1 mg/l. Si el nivel de oxígeno disuelto es inferior a este valor, el oxígeno se convierte en el elemento limitante del proceso, y puede producirse el cese o la ralentización de los fenómenos de nitrificación.

Es necesario resaltar que la transformación de nitrógeno amoniacal en nitrógeno en forma de nitrato, no supone la eliminación del nitrógeno presente en las aguas a tratar, aunque sí permite eliminar su demanda de oxígeno. Para la eliminación biológica del nitrógeno se precisa que los procesos de nitrificación vayan seguidos de una etapa de desnitrificación.

La desnitrificación es realizada por bacterias facultativas heterótrofas (*Achromobacter*, *Aerobacter*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Flavobacterium*, *Lactobacillus*, *Micrococcus*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Spirillum*), en condiciones de anoxia y en dos etapas. En un primer paso se produce la conversión del nitrato en nitrito, y a continuación éste pasa a formas gaseosas que escapan del sistema hacia la atmósfera (óxido nítrico, óxido nitroso y nitrógeno gas).

En los procesos de desnitrificación, el parámetro crítico es la concentración de oxígeno disuelto, cuya presencia suprime el sistema enzimático necesario para el desarrollo de estos procesos

El pH óptimo para el proceso de desnitrificación se sitúa en el intervalo 7-8, viéndose afectado el proceso por la temperatura. El proceso requiere la presencia de carbono orgánico en cantidad suficiente, admitiéndose que para reducir 1 g de nitrato se necesitan 3 g de DBO₅ no decantable. En los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical se potencian los procesos de nitrificación, debido, fundamentalmente, a que se alimentan de forma intermitente, lo que favorece un lecho más oxidado y, por tanto, más eficiente.

La adopción de sistemas combinados de humedales con diferentes características de flujo, Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical seguidos de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal, permite mejorar notablemente la eliminación de nitrógeno, al favorecerse en la primera etapa la nitrificación y la desnitrificación en la segunda.

3.6.3.2 Eliminación del fósforo

En las aguas residuales urbanas el fósforo se encuentra tanto en forma orgánica, como en forma de ortofosfato inorgánico o de fosfatos complejos. Estos últimos, en el transcurso de los tratamientos biológicos se hidrolizan dando lugar a ortofosfatos, incorporándose entre el 10-20% de los mismos a la biomasa bacteriana.

Las principales vías para la eliminación del fósforo en los Humedales Artificiales son:

- Absorción directa por parte de las plantas.

- Adsorción sobre partículas de arcilla, partículas orgánicas y compuestos de hierro y aluminio.
- Precipitación, mediante reacciones del fósforo con el hierro, aluminio y calcio presentes en las aguas, dando lugar a la formación de fosfatos insolubles.

La absorción del fósforo por las plantas se da en mucha menor cuantía que en el caso del nitrógeno (esta absorción es del orden de un 10%), siendo los fenómenos fisicoquímicos los que juegan el papel principal en la reducción de este nutriente.

El fósforo fijado-precipitado puede liberarse durante determinadas épocas del año en función de las condiciones ambientales y, fundamentalmente, como respuesta a cambios en el potencial de óxido-reducción.

En general, en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial la eliminación de fósforo no es muy significativa situándose entre el 15-30%. Puede incrementarse este porcentaje de reducción de fósforo mediante el empleo de sustratos filtrantes específicos (p.e. con contenidos en hierro), que potencien la retención del mismo.

Tanto para Humedales Artificiales Superficiales como Subsuperficiales, Reed y col. proponen la siguiente expresión, para la evaluación de la eliminación de fósforo:

Ecuación 4. Cálculo de la eliminación del fósforo

$$P_e = P_i \times \exp\left(-k_p / CHS\right)$$

Donde:

P_e : concentración de fósforo en el efluente (mg/l)

P_i : concentración de fósforo en el influente (mg/l)

K_p : constante de reacción con un valor de 2,73 cm/d

CHS: carga hidráulica superficial (cm/d)

Se ha observado, que en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial inicialmente se retiene una mayor cantidad de fósforo, como consecuencia de que en esta etapa el sustrato

presenta una mayor cantidad de zonas disponibles para su adsorción, disminuyendo paulatinamente esta capacidad de retención con el tiempo.

3.6.4 Eliminación de patógenos

La eliminación de microorganismos es un proceso de gran complejidad ya que depende de factores como la filtración, la adsorción y la depredación (Kadlec, 2000). Se ha observado que tanto en sistemas verticales como horizontales la eliminación es dependiente del tiempo de permanencia y del medio granular.

En general, la mayoría de los estudios realizados en Humedales Artificiales muestran como la eliminación de bacterias coliformes fecales puede alcanzar valores entre 1 y 2,5 unidades logarítmicas (Rivera, 1995; Tanner, 1995; Williams, 1995; Ottová, 1997; Decamp, 1999), mientras que en los colífagos pueden alcanzar entre 0,5 y 2 unidades logarítmicas (Williams, 1995; Gerba, 1999; Barret, 2000; Hagendorf, 2000).

En los Humedales Artificiales la eliminación de coliformes fecales se ajusta a modelos e cinética de primer orden, lográndose la mayor parte del abatimiento de los patógenos en los primeros tramos de los humedales, de forma que hacia la mitad de los mismos ya se ha eliminado del orden del 80% de los mismos.

Los organismos patógenos presentes se eliminan por diferentes mecanismos, destacando:

- La adsorción de los patógenos sobre las partículas del sustrato filtrante.
- La toxicidad que sobre los organismos patógenos ejercen los antibióticos producidos por las raíces de las plantas.
- La acción depredadora de bacteriófagos y protozoos.

Reed y col., asumiendo que los mecanismos de eliminación de patógenos en Humedales Artificiales son muy parecidos a los que se dan en los sistemas de Lagunaje, proponen una ecuación similar para cuantificar su abatimiento:

Ecuación 5. Cálculo del abatimiento de patógenos

$$C_e = C_i / (1 + t \times K_t) \times n$$

Donde:

C_e : concentración de patógenos en el efluente (UFC/100 ml)

C_i : concentración de patógenos en el influente (UFC/100 ml)

t : temperatura (°C)

K_t : constante de reacción (d^{-1})

n : número de humedales en serie

La dependencia de la constante de reacción K_t con la temperatura, viene dada por la expresión:

Ecuación 6. Cálculos de la constante de la reacción K_t

$$K_t = K_r \times \theta_R \times (T_w - T_r)$$

Donde:

K_r = constante de reacción a la temperatura de referencia (d^{-1})

T_w : temperatura del agua considerada en el diseño (°C). Suele emplearse la temperatura media del mes más frío

T_r : temperatura de referencia a la que se ha calculado el coeficiente θ_R (°C) (suele ser 20 °C)

θ_R = coeficiente de temperatura (adimensional)

Para el abatimiento de coliformes fecales, los valores de K_r y θ_R , son 2,6 d^{-1} y 1,19, respectivamente.

3.6.5 Eliminación de metales pesados

La eliminación de metales (cadmio, cinc, cobre, cromo, mercurio, selenio, plomo, etc.), en los Humedales Artificiales, tiene lugar a través de diferentes vías:

- Procesos de adsorción.
- Precipitación química.
- Sedimentación.

- Asimilación por parte de las plantas.

Los metales retenidos pueden volver a liberarse en determinadas épocas del año, en función de las variaciones del potencial de oxido-reducción que tienen lugar dentro del sistema.

3.7 Rangos poblacionales para la aplicación de los Humedales Artificiales

Los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial encuentran su principal rango de aplicación en el tratamiento de las aguas residuales generadas en aglomeraciones urbanas de menos de 2.000 habitantes equivalentes.

Los requisitos de superficie para la implantación de este tipo de humedales, que oscila entre los 3 m²/habitante-equivalente, para los Humedales de Flujo Vertical, y los 5 m²/habitante-equivalente para los de Flujo Horizontal, es el principal limitante a la hora de aplicar este sistema de tratamiento a poblaciones mayores.

Otro condicionante, que limita el empleo de este tipo de humedales para poblaciones de mayor tamaño, tiene que ver con la dificultad de conseguir un buen comportamiento hidráulico del sistema cuando los caudales de alimentación son elevados.

De acuerdo con la Directiva 91/271/CEE, relativa al tratamiento de las aguas residuales, las aglomeraciones urbanas menores de 2.000 habitantes-equivalentes, en las que se exige la aplicación de un tratamiento adecuado, que debía estar operativo a comienzos del año 2006, constituyen la principal aplicación de los Humedales de Flujo Subsuperficial.

Por el contrario, los Humedales Artificiales de Flujo Superficial, que normalmente se emplea para la creación y regeneración de hábitats acuáticos, son instalaciones que llegan a ocupar varias hectáreas, que son alimentadas con los efluentes de estaciones depuradoras de aguas residuales, que trabajan con tecnologías Convencionales (Lodos Activos, Aireaciones Prolongadas), y que dan servicios a poblaciones de tamaño medio-grande.

3.8 Condiciones climáticas para la aplicación de los Humedales Artificiales

Dentro de las condiciones climáticas que afectan más directamente al funcionamiento de los Humedales Artificiales, la temperatura juega un papel destacado. Al transcurrir la mayoría de los procesos de eliminación de contaminantes, que acontecen en esta tecnología de tratamiento, por vías biológicas, las velocidades a las que transcurren dichos procesos se ven directamente afectadas por la temperatura ambiente y por la temperatura de las propias aguas a tratar. Cabe recordar, que dentro del rango térmico en el que se desarrollan los microorganismos, cada incremento de 10 °C duplica las velocidades de las reacciones.

Dentro de los procesos que se ven afectados por la temperatura se encuentran los involucrados en la eliminación de DBO₅ y de amoníaco. Por otro lado, la temperatura también afecta a la solubilidad del oxígeno en el agua. Para temperatura media del agua inferior a 9°C la concentración de saturación de oxígeno es de 11,6 mg/l, mientras que para temperaturas de 18°C la concentración es de 9,6 mg/l.

Los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial presentan una mayor protección térmica en relación a los de Flujo Superficial, al discurrir las aguas de forma subterránea, y al contribuir los restos de vegetación que caen sobre el sustrato a minimizar los gradientes térmicos. En el caso de los Humedales de Flujo Superficial para minimizar los riesgos de congelación del agua circulante, suele recurrirse a incrementar en la época invernal el espesor de la lámina de agua en los humedales.

La temperatura también afecta al propio comportamiento de la vegetación implantada en los Humedales Artificiales. Las especies más habituales en este tipo de humedales presentan los siguientes rangos óptimos para su funcionamiento:

- Juncos (18 - 27 °C)
- Aneas (10 - 30 °C)
- Carrizos (12 - 23 °C)

Por otro lado, en primavera-verano la mayor producción de biomasa vegetal, incrementa sus necesidades de nutrientes (N y P), lo que conduce a unos mayores rendimientos en la eliminación de estos elementos.

Con relación a la pluviometría, los Humedales Artificiales se adaptan bien a variaciones pasajeras de cargas hidráulicas, tales como precipitaciones de corta duración. Por el contrario, para regiones particularmente pluviosas, el dimensionamiento debe basarse en la estimación del caudal para tiempo de lluvia.

En lo referente a la evapotranspiración, que puede llegar a ser elevada en función del tipo de vegetación empleada, debe ser tenida en cuenta en la etapa de diseño, ya que si se utiliza una superficie excesiva de humedal se puede llegar a dar la circunstancia de que el agua que entre al sistema de tratamiento sea insuficiente para mantener la tasa de transpiración de la vegetación. Se producirá entonces una falta de agua que, si es prolongada, puede llevar incluso a la muerte de las plantas.

En la actualidad son numerosas las instalaciones de Humedales Artificiales que se encuentran operando correctamente en condiciones climáticas muy adversas en comparación a las que son habituales en el territorio andaluz, por lo que cabe concluir que no hay limitaciones de carácter climatológico para la implantación en Andalucía de esta tecnología de tratamiento de las aguas residuales urbanas

3.9 Rendimientos de depuración de los Humedales Artificiales

3.9.1 Humedales Artificiales de Flujo Superficial

Dado que los Humedales Artificiales de Flujo Superficial se suelen emplear a modo de tratamiento terciario, presentando las aguas influentes características muy variadas, en función del grado de depuración alcanzado en las etapas previas, para mostrar los rendimientos que se alcanzan en este tipo de humedales se ha optado por presentar las características medias de los

influentes y efluentes de un conjunto de 27 humedales de esta modalidad, sometidos a seguimiento por la EPA en el año 2000 (Tabla 5).

Tabla 5. Características medias de las corrientes de entrada y salida a un conjunto de Humedales Artificiales de Flujo Superficial (EPA 2000)

Parámetro	Influente	Efluente	% reducción
Sólidos en suspensión (mg/l)	69	15	78
DBO ₅ (mg/l)	70	15	79
N-NTK (mg/l)	18	11	39
N-NH ₃ /NH ₄ (mg/l)	9	7	22
N-NO ₃ (mg/l)	3	1	67
N-total (mg/l)	12	4	67
P-total (mg/l)	4	2	50
P-disuelto (mg/l)	3	2	33
Coliformes fecales (UFC/100 ml)	73.000	1.320	98

Como complemento, la Tabla 6 muestra las concentraciones de Sólidos en Suspensión y DBO₅ en las corrientes de entrada y salida de distintos Humedales Artificiales de Flujo Superficial implantados en EE.UU., indicándose, igualmente, la procedencia de los influentes.

Tabla 6. Rendimientos de depuración de Humedales Artificiales de Flujo Superficial

Ubicación	Tipo de influente	SST (mg/l)		DBO ₅ (mg/l)		Referencia
		Influente	Efluente	Influente	Efluente	
Arcata, California	Laguna de oxidación	30	14	26	12	Gearheart, 1989
Cannon Beach, Oregon	Laguna facultativa	45	8	27	5	U.S.E.P.A., 1993
Fort Deposit, Alabama	Laguna de oxidación	91	13	33	7	U.S.E.P.A., 1993
Gustine, California	Laguna de oxidación	102	31	75	19	Crites, 1996
Iselin, Pensilvania	Laguna de oxidación	380	53	140	17	Watson, 1979
Listowel, Ontario	Primario	111	8	56	10	Herskowitz, 1987
Ouray, Colorado	Laguna de oxidación	86	14	63	11	Andrews, 1996
West Jackson Co., Mississippi	Laguna facultativa	40	14	26	7	U.S.E.P.A., 1993

3.9.2 Humedales de Flujo Subsuperficial

La Tabla 7 muestra los rendimientos medios de depuración que se alcanzan con el empleo de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales urbanas (Salas, 2007).

Tabla 7. Rendimientos de depuración en Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial

Parámetro	% de reducción (H.A. Horizontal)	% de reducción (H.A. Vertical)
Sólidos en Suspensión	90 – 95	90 – 95
DBO ₅	85 – 95	90 – 95
DQO	80 – 90	80 – 90
Nitrógeno total	20 – 40	60 – 70
Fósforo total	20 – 30	20 – 30

3.10 Puesta en marcha de una instalación de Humedales Artificiales

Como paso previo a la puesta en servicio de una instalación de Humedales Artificiales se procederá a la comprobación de:

- El correcto funcionamiento de los elementos integrantes del:
 - Pretratamiento: rejas de desbaste.
 - Tratamiento primario: fosas sépticas, tanques Imhoff.
 - Sistema de medida de caudal.
 - Compuertas y válvulas que permiten el by-pass de las aguas y la puesta en marcha/paro de los diferentes humedales implantados.
- La estanqueidad de los recintos que contienen los sustratos filtrantes y las plantas.

La alimentación a los humedales se iniciará una vez finalizada la plantación, para favorecer su crecimiento.

Desde el primer momento de su puesta en operación los humedales comienzan su función depuradora, basada inicialmente en procesos de filtración a través del sustrato. Paulatinamente, sobre estos soportes se irá desarrollando la biomasa bacteriana, comenzando a tener importancia los procesos biológicos de degradación de los contaminantes, a la vez que las plantas irán captando los nutrientes que precisan para su desarrollo.

En el caso de los Humedales de Flujo Subsuperficial, la etapa de arranque y estabilización del sistema, en la que se va desarrollando toda la zona radicular de las plantas y la biomasa bacteriana coloniza el sustrato y los rizomas y raíces, se extiende aproximadamente a lo largo de un ciclo vegetativo. En los Humedales de Flujo Superficial es preciso el transcurso de dos-tres ciclos vegetativos para alcanzar un régimen operativo estable (Kadlec, 1996).

Inicialmente, en los Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal el nivel de agua se mantendrá unos 5 cm por debajo de la superficie del sustrato filtrante, y se irá bajando paulatinamente para favorecer un más rápido desarrollo de la zona radicular de las plantas durante el primer ciclo de su crecimiento. Al final de este proceso, el nivel del agua en el sustrato recuperará su valor inicial.

Durante los periodos de puesta en operación de los humedales se procederá a la eliminación de toda la vegetación espontánea que pueda aparecer en los mismos, para evitar competencias con las especies implantadas.

3.11 Mantenimiento y explotación de instalaciones de Humedales Artificiales

Se describen a continuación las operaciones a llevar a cabo para la correcta explotación y mantenimiento de los diferentes elementos constitutivos de una estación depuradora basada en la tecnología de Humedales Artificiales.

3.11.1 Mantenimiento del Pretratamiento y Tratamiento Primario

En el caso de los Humedales Artificiales y, fundamentalmente, en los de Flujo Subsuperficial, los tratamientos previos (Pretratamiento y Tratamiento Primario), son básicos e imprescindibles para prevenir colmataciones del sustrato filtrante y de los propios sistemas de reparto de las aguas a tratar.

3.11.1.1 Desbaste

Cuando se detecten sedimentaciones en el fondo de los canales en los que se ubican las rejas de desbaste se procederá a su extracción para su envío a vertedero.

En aquellos casos en los que el desbaste se ubique en distintos canales, periódicamente se procederá a comprobar el funcionamiento y estanqueidad de las compuertas que permiten enviar las aguas hacia el canal que en cada momento se encuentre operativo. Si dichas compuertas tienen vástagos de accionamiento periódicamente se efectuará el engrase de los mismos.

Rejas de desbaste de limpieza manual

La limpieza de estas rejas se efectuará por rastrillado, depositándose los residuos que se extraigan en los cestillos perforados dispuestos al efecto, con objeto de conseguir su escurrido antes de su recogida en un contenedor, para su posterior envío a vertedero. Debe tomarse especiales precauciones al rastrillar las rejas de desbaste, dado que la firmeza de los pies del operario puede presentar dificultades debido al agua y a las grasas que suelen acumularse en la zona, a la falta de espacio para colocarse adecuadamente, y/o a la situación del contenedor en el que se depositan los residuos.

La periodicidad de la limpieza será, en principio, diaria, si bien la experiencia que se adquiera con el tiempo de explotación de la estación depuradora fijará la frecuencia real con que haya que realizarse esta operación. No obstante, es aconsejable que dicha periodicidad no sea muy superior a la citada, aunque el volumen de sólidos retenidos sea escaso, para evitar la aparición

de olores desagradables. Especial atención se prestará a la limpieza de las rejas de desbaste en períodos de lluvias, dado que en esos momentos será mucho mayor el volumen y la heterogeneidad de los sólidos retenidos en las mismas.

Rejas de desbaste de limpieza automática

Diariamente, para evitar la generación de olores desagradables, se deberá proceder a la retirada de los residuos extraídos para su envío a vertedero. Los tiempos de accionamiento de los peines de limpieza se ajustarán en consonancia con las observaciones que se efectúen sobre su funcionamiento, incrementándose en época de lluvias.

De acuerdo con el programa de la casa fabricante de los equipos electromecánicos implantados en el desbaste, se procederá regularmente al engrase (empleando para ello el lubricante que se especifique) y a la supervisión de los elementos mecánicos que se indiquen.

Los residuos que no sean extraídos por los peines se eliminarán de forma manual mediante rastrillado, previa desconexión del equipo.

3.11.1.2 Tratamiento Primario: fosas sépticas y tanques Imhoff

Las grasas y flotantes que se acumulen en la superficie de las fosas sépticas o tanques Imhoff se retirarán periódicamente, haciendo uso de un recoge hojas de piscina. La retirada de sobrenadantes se llevará a cabo cuando se observe la formación de una capa consistente de los mismos, al objeto de minimizar la extracción de agua. Las grasas retiradas se irán acumulando en un contenedor dispuesto al efecto, para su posterior recogida por agente autorizado.

Periódicamente, se procederá a la extracción de los lodos acumulados. Para esta operación se requerirá el empleo de un camión cisterna dotado con equipo de bombeo. Los lodos extraídos se transportarán a una estación de tratamiento de fangos o podrán deshidratarse *in situ*, mediante el empleo de eras de secado

3.11.2 Mantenimiento de los Humedales Artificiales

El mantenimiento de los Humedales Artificiales está ligado a que se trate de Humedales de Flujo Superficial o de Flujo Subsuperficial.

3.11.2.1 Humedales de Flujo Superficial

Periódicamente, se procederá a la limpieza de los sistemas de distribución ubicados en cabecera de los canales. La frecuencia de esta operación la marcará las condiciones operativas de cada situación concreta. Debe controlarse la posible aparición de mosquitos, ya que estos tienden a desarrollarse en aguas someras, que es el caso de esta modalidad de humedales. Las zonas con mayor riesgo para el desarrollo de estos insectos son los márgenes de los humedales, por lo que es recomendable que estos márgenes se encuentren desprovistos de vegetación, o que ésta se encuentre lo suficientemente dispersa para permitir el desarrollo de organismos depredadores de las larvas de mosquito. Otra medida paliativa pasa por construir los márgenes con una mayor inclinación (3/1 o más), para reducir las zonas potenciales de desarrollo de este tipo de insectos.

En aquellos casos en que el objetivo básico de la implantación de los humedales sea la restauración de ecosistemas, el cosechado de la biomasa tan sólo es recomendable cuando esta biomasa presente un crecimiento excesivo, que pueda llegar a impedir el buen funcionamiento hidráulico del Humedal.

En este tipo de humedales, las operaciones de siega y de retirada de la biomasa seca, provocan la resuspensión de parte de la materia depositada en su fondo.

3.11.2.2 Humedales de Flujo Subsuperficial

Periódicamente, se procederá a la limpieza de los sistemas de distribución ubicados en cabecera de los canales. La frecuencia de esta operación la marcará las condiciones operativas de cada situación concreta.

Se evitará en todo momento la entrada a las instalaciones de la estación depuradora de animales que puedan emplear las especies vegetales implantadas en los humedales como alimento. También se evitará, en lo posible, pisar el sustrato filtrante para evitar su compactación, lo que disminuiría su conductividad hidráulica.

El corte de las plantas secas, de forma manual o mecánica, y su retirada, debe hacerse finalizado el período vegetativo, si no se quiere que las partes secas caigan sobre el sustrato y liberen los nutrientes retenidos.

Dado que los rendimientos en la eliminación de nutrientes que se logran mediante la siega y retirada periódica de la biomasa vegetal de los Humedales Artificiales no son muy elevados, situándose por debajo del 20% en lo que al nitrógeno se refiere, y por debajo del 10% en el caso del fósforo, en ocasiones se pone en duda la necesidad de estas operaciones de mantenimiento, llegándose a aconsejar que no se lleven a cabo en climas fríos, dado el efecto de protección térmica que ejerce la vegetación.

Por el contrario, en la zona mediterránea sí se recomienda proceder al cosechado de la biomasa una vez al año, para evitar la acumulación de materia muerta (necrosoma) en el humedal, siendo aconsejable que la siega se lleve a cabo una vez pasado el periodo de posibles heladas. Esta cosecha de la biomasa permite la limpieza de los lechos y la revisión de los sistemas de alimentación-distribución (principalmente en los de Flujo Vertical), de los taludes, etc. En todo caso, se evitará la siega de la biomasa en los periodos de nidificación de las aves que habiten en el Humedal.

Especialmente en los primeros meses de operación de los Humedales de Flujo Subsuperficial deben eliminarse las malas hierbas que hacen competencia al carrizo. Estas malas hierbas deben extraerse a mano, evitando en todo momento el uso de herbicidas.

Periódicamente se controlará la aparición de enfermedades en las plantas, si esto ocurre se iniciarán los pertinentes tratamientos, de acuerdo con las indicaciones del personal especializado.



Ilustración 1. Siega manual de la plantación de carrizo una vez seca



Ilustración 2. Siega mecanizada de la plantación de carrizo una vez seca



Ilustración 3. Evacuación de la biomasa seca tras la siega de un Humedal

La siguiente secuencia de fotografías muestra el desarrollo de la vegetación en un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial tras haber procedido a su siega y retirada de la biomasa vegetal.



Ilustración 4. Evolución de la vegetación de un Humedal Subsuperficial tras su siega (Febrero 2006)



Ilustración 5. Evolución de la vegetación de un Humedal Subsuperficial tras su siega (Marzo 2006)

3.11.3 Seguimiento del proceso

Para comprobar el correcto funcionamiento de una estación depuradora basada en la tecnología de Humedales Artificiales y poder prevenir posibles anomalías, es preciso el seguimiento y control periódico de una serie de parámetros.

Se aconseja que las visitas a la estación depuradora sean diarias al objeto de detectar, lo antes posible, cualquier posible incidencia que pudiese repercutir negativamente en su funcionamiento. Para dejar constancia de sus observaciones, el operador de la estación depuradora dispondrá de un cuadernillo en el que anotará:

- La fecha y hora de la visita a la estación depuradora
- Los caudales tratados de aguas residuales
- El número e identificación de los Humedales Artificiales puestos en operación
- El aspecto de las plantas de los humedales y del efluente depurado
- Las posibles anomalías en los viales y en la obra civil en general

- Las fechas de realización de las diferentes tareas de mantenimiento: limpieza de rejillas, retirada de lodos en el tanque Imhoff (fosa séptica), siega y retirada de las plantas secas, etc.
- Si la estación de tratamiento está dotada de energía eléctrica para: el accionamiento de los elementos del Pretratamiento, bombeo entre humedales, riego con los efluentes depurados, iluminación, etc., se anotarán las lecturas de los contadores correspondientes

En el apartado de “observaciones” se registrarán cuantas incidencias se estimen oportunas sobre: las características visuales y olfativas de las aguas residuales, el posible empleo de los efluentes depurados por los agricultores de la zona, la duración de los períodos de lluvia intensa, etc.

En el caso de que la instalación de Humedales Artificiales cuente con equipos electromecánicos (rejillas de desbaste de limpieza automática, caudalímetros, bombas, etc.), estos equipos dispondrán de fichas individualizadas donde se registrarán:

- Sus características operativas
- Sus horas de funcionamiento
- El calendario de operaciones de mantenimiento
- Las averías sufridas
- Todas aquellas observaciones que sobre su funcionamiento se consideren pertinentes

Una tarea importante que habrá de realizar el operador de la estación de tratamiento es la medición de los caudales, tanto de las aguas residuales influentes como de las aguas depuradas.

En aquellas estaciones dotadas de medidores de caudal con registro tan sólo será necesario anotar las lecturas, pero cuando se carece de estos elementos de medida será preciso recurrir a métodos: volumen-tiempo (determinando el tiempo que tarda en llenarse un recipiente de capacidad conocida; en el caso de instalaciones con cámaras de bombeo deteniendo la alimentación, arrancando las bombas y determinando el descenso de la lámina líquida en un

tiempo determinado), o a métodos sección-velocidad (determinado el tiempo que una mancha, producida por la adición de un colorante, tarda en recorrer la distancia entre dos pozos de registro contiguos del colector de llegada a la estación depuradora).

Independientemente del seguimiento rutinario, será necesario realizar en laboratorio el control de una serie de parámetros que permitan conocer el nivel de depuración alcanzado, con objeto de poder determinar el grado de cumplimiento de la Directiva 91/271.

En el Diario Oficial de las Comunidades Europeas de 30 de Mayo de 1991 se publicó la Directiva del Consejo 91/271, de 21 de Mayo de 1991, referente al tratamiento de las aguas residuales urbanas. La Directiva contiene estipulaciones relativas al transporte, tratamiento y descarga de las aguas residuales, siendo su objetivo la protección del medio ambiente de los efectos adversos de estos vertidos, estableciendo unos requisitos mínimos para la descarga de dichas aguas residuales (Tabla 8).

Tabla 8. Requisitos para los vertidos procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (1)	Método de medida de referencia
DBO ₅ a 20°C sin nitrificación (2)	25 mg/l O ₂	70-90 (40 a 1500 m por encima del nivel del mar)	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Determinación de oxígeno disuelto antes y después de 5 días de incubación a 20°C ± 1 °C, en completa oscuridad. Aplicación de un inhibidor de nitrificación
	DQO	125 mg/l O ₂	75
Total de sólidos en suspensión	35 mg/l (3)	90	Filtración de una muestra representativa a través de una membrana de filtración de 0,45 micras. Secado a 105°C y pesaje Centrifugación de una muestra representativa (durante 5 minutos como mínimo, con una aceleración media de 2800 a 3200 g), secado a 105°C y pesaje
	(más de 10000 h.e);	(más de 10000 h.e);	
	60 mg/l (de 2000 a 10000 h.e)	70 (de 2000 a 10000 h.e)	
(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada			
(2) Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre DBO5 y el parámetro sustitutivo			
(3) Este requisito es optativo			

Para aglomeraciones urbanas entre 2.000 y 9.999 habitantes-equivalentes, la Directiva establece que se efectúen a lo largo del primer año de seguimiento de la estación de tratamiento un mínimo de 12 muestreos. Las muestras se tomarán durante períodos de 24 horas, a intervalos regulares y proporcionales al caudal circulante. Del total de muestreos efectuados deberán cumplir los requisitos anteriores, en cuanto a concentración o porcentaje de reducción, un mínimo de 10. Si esto se cumple en años próximos, el número de muestras a tomar será de 4.

En el caso de que el vertido final de la estación de tratamiento se realice a una zona catalogada como “sensible”, será necesario proceder también a la determinación de los contenidos en Nitrógeno y Fósforo, de acuerdo con la Tabla 9.

Tabla 9. Requisitos para los vertidos en zonas sensibles propensas a eutrofización

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción(1)	Método de medida de referencia
Fósforo total	2 mg/l (10000 - 100000 h.e) 1 mg/l (más de 100000 h.e)	80	Espectrofotometría de absorción molecular
Nitrógeno total(2)	15 mg/l (10000 - 100000 h.e)(3) 10 mg/l (más de 100000 h.e)(3)	70-80	Espectrofotometría de absorción molecular
(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada			
(2) Nitrógeno total equivale a la suma de nitrógeno Kjeldahl total (N orgánico y amoniacal), nitrógeno en forma de nitrato y nitrógeno en forma de nitrito.			
(3) Estos valores de concentración constituyen medidas anuales. No obstante, los requisitos relativos al nitrógeno pueden comprobarse mediante medidas diarias cuando se demuestre que se obtiene el mismo nivel de protección. En ese caso, la medida diaria no debe superar los 20 mg/l de nitrógeno total para todas las muestras, cuando la temperatura del efluente del reactor biológico sea superior o igual a 12°C. En sustitución del requisito relativo a la temperatura, se podrá aplicar una limitación del tiempo de funcionamiento que tenga en cuenta las condiciones climáticas regionales.			

El correcto mantenimiento de la estación depuradora y de su entorno contribuye de forma notable a minimizar el impacto que produce este tipo de instalaciones. En este mantenimiento se incluyen el mantenimiento de la obra civil y de las conducciones, el control del buen estado del cerramiento, el cuidado de la ornamentación vegetal implantada, el control de roedores, etc.

Como norma general de obligado cumplimiento, en todas aquellas operaciones de mantenimiento en las que el operario entre en contacto con las aguas a tratar es imprescindible el empleo de guantes desechables, y al final de dichas operaciones se deberá proceder a una limpieza a fondo de las manos y de las herramientas empleadas.

En la caseta de servicio se dispondrá de un botiquín dotado de todo lo necesario para hacer frente a los pequeños accidentes que puedan ocurrir en el transcurso de las operaciones de mantenimiento de la depuradora.

3.12 Problemas más frecuentes: la colmatación del sustrato

El principal, y más grave, problema que puede darse en la explotación de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial radica en la colmatación del sustrato (Rousseau, 2004), lo que tendrá su reflejo en la aparición de charcos en la superficie del humedal y en la instauración de condiciones de operación anaerobias, con la consiguiente disminución en los rendimientos de depuración, pérdida de conductividad hidráulica y porosidad y en general el empeoramiento del aspecto de los efluentes depurados (García, 2004 b; Tanner, 1995; Tanner, 1998; Vandevivre, 1992).



Ilustración 6. Aspecto típico de un Humedal Artificial colmatado

Los mecanismos exactos de colmatación no están totalmente esclarecidos, sin embargo muchos autores coinciden en que los principales son los siguientes (Suliman, 2006; Coppola, 2004; Kadlec, 2009):

- Deposición de sólidos en suspensión inertes (minerales)
- Acumulación de materia orgánica refractaria (resistente a la degradación bacteriana)
- Depósitos de precipitados químicos en el sustrato
- Carga de materia orgánica (tanto suspendida como disuelta) que provoca el crecimiento de la biopelícula microbiana sobre el sustrato
- Desarrollo de las raíces y rizomas de la vegetación plantada en el humedal
- Degradación del propio sustrato (Pedescoll, 2009)

3.12.1 Depósito de sedimentos

El depósito de sedimentos puede ocurrir por varias razones, entre ellas cabe destacar las propias características iniciales del sustrato. Si el medio granular no viene lo suficientemente lavado puede traer consigo gran cantidad de material inerte muy fino, que en poco tiempo irá colmatando los huecos del sustrato. También pueden venir finos con las propias raíces de las plantas utilizadas.

Debido a la baja velocidad de la corriente, los sólidos en suspensión del influente se depositarán en la zona de alimentación del Humedal. Como los huecos son ocupados por los sólidos en suspensión, la conductividad hidráulica se reduce progresivamente (Kadlec, 2009).

Esto se aplica tanto a los sedimentos minerales como a los sedimentos orgánicos, que son refractarios y resistentes a la degradación microbiana.

3.12.2 Precipitados químicos

Las reacciones químicas dentro de los Humedales de Flujo Subsuperficial pueden ocasionar la formación de precipitados químicos insolubles (Liebowitz, 2000; Younger, 2002). Estos precipitados pueden bloquear los huecos del sustrato y, por consiguiente, reducir la conductividad hidráulica.

3.12.3 Formación de biopelícula

La formación de biopelícula responde a la existencia de carga orgánica tanto soluble como particulada. En ella se quedan atrapados tanto sólidos orgánicos como inorgánicos (Winter, 2003), formando lo que algunos autores llaman “*biomateria*”, su composición variará según el agua residual que se esté tratando. La formación de esta *biomateria* es mayor en la zona de alimentación ya que es aquí donde la carga orgánica es más alta (Raguso, 2004). Este crecimiento de *biomateria* provoca una pérdida de conductividad hidráulica en la zona inicial (Zhao, 2004). A medida que la materia orgánica atraviesa el humedal su concentración va disminuyendo, lo cual lleva parejo la menor formación de *biomateria* hacia el final del mismo, llegando incluso a ser inapreciable en este último tramo (Wallace, 2006).

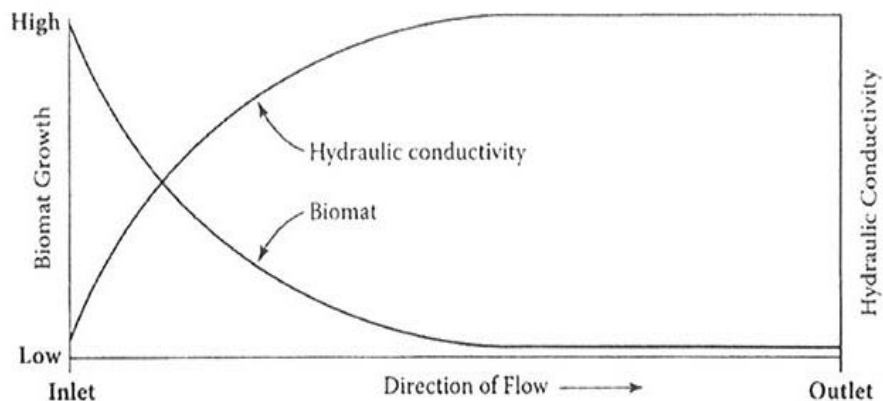


Figura 8. Relación entre conductividad hidráulica y formación de biomasa (Wallace, 2006)

3.12.4 Morfología de las raíces de la plantas

Las plantas de los Humedales en los sistemas de Flujo Subsuperficial Horizontal desarrollan su sistema radicular preferentemente en la parte superior del medio granular. Esta morfología del rizoma está fuertemente correlacionada con la condiciones redox del sistema dentro del relleno del humedal (Lockhart, 1999). Esta limitada penetración del sistema radicular puede crear corrientes preferenciales a través de los tramos más profundos del sustrato de grava (Breen, 1995; USEPA, 2000; Whitney, 2003; Nivala, 2005).

3.12.5 Degradación del propio sustrato

Algunos estudios (Pedescoll, 2009), han analizado la composición del lodo acumulado procedente de Humedales de Flujo Horizontal con problemas de colmatación, y la han comparado con la que presenta la propia grava del sustrato. Dichas composiciones son similares, por lo que se sugiere la existencia de procesos de desintegración del medio granular por ataque ácido (ambiente derivado de las condiciones de anaerobiosis típica de estos sistemas). Se propone, por tanto, que otra causa de la colmatación del sustrato, y por consiguiente de la disminución de conductividad hidráulica es la propia desintegración del mismo a lo largo del tiempo. Este es hoy por hoy el mayor problema de operación en los Humedales Artificiales de Flujo Horizontal y es común en todas las partes del mundo.

Existen una serie de recomendaciones para paliar o por lo menos retrasar en el tiempo el fenómeno de la colmatación. A este respecto señalar que el informe de la USEPA (2000) recomienda que la carga máxima de sólidos para los sistemas de Flujo Subsuperficial en general no sea superior a $20 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$. Este valor, según señalan otros autores (García, 2004), se considera bastante elevado, ya que para que los sistemas (al menos los de Flujo Subsuperficial Horizontal) funcionen adecuadamente la carga de sólidos debe ser similar a la de DBO_5 , que como mucho debe ser de $6 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$.

3.13 Otras anomalías

En invierno es normal que mueran las hojas y los tallos del carrizo. Si esto ocurriese en otros momentos del año, y no se debiese a falta de agua, la causa podría radicar en la presencia de sustancias tóxicas en las aguas a depurar, en la aparición de algún tipo de enfermedad en las plantas, o en el ataque de plagas. Estas últimas situaciones se solventarán mediante la aplicación de los adecuados tratamientos fitosanitarios.

Como norma general, para evitar los problemas que ocasionan los vertidos incontrolados a la red de saneamiento municipal (aceites usados, efluentes industriales, residuos de instalaciones

ganaderas), se recomienda la implantación y el cumplimiento riguroso de una Ordenanza de Vertido a Colectores Municipales.

3.14 Ventajas e inconvenientes de los Humedales Artificiales

Los Humedales Artificiales, como cualquier otro sistema de depuración de aguas residuales, presentan una serie de ventajas e inconvenientes que pueden aconsejar o no su utilización en cada caso concreto.

Entre las ventajas destacan:

- Sencillez operativa, al limitarse las labores de explotación a la retirada de residuos del pretratamiento y al corte y retirada de la vegetación una vez seca
- Consumo energético nulo, si las aguas residuales a tratar pueden circular por gravedad hasta los humedales
- Inexistencia de averías al carecer de equipos mecánicos
- En el caso de los Humedales de Flujo Superficial y de los de Flujo Horizontal, al operar con elevados tiempos de retención, se toleran bien las puntas de caudal y de carga
- En los Humedales de Flujo Subsuperficial se simplifica la gestión de los lodos que se generan en el proceso depurador, al procederse a su purga en las fosas sépticas (o tanques Imhoff), tras largos periodos de tiempo
- Posible aprovechamiento de la biomasa vegetal generada (ornamentación, alimentación animal)
- Los Humedales de Flujo Superficial, principalmente, permiten la creación y restauración de zonas húmedas, aptas para potenciar la vida salvaje, la educación ambiental y las zonas de recreo
- Mínima producción de olores, al no estar expuestas al aire las aguas a tratar en los Humedales de Flujo Subsuperficial, y por alimentarse con efluentes ya depurados los Humedales de Flujo Superficial

- Perfecta integración ambiental.

Como principales desventajas pueden citarse:

- Exigen una mayor superficie de terreno para su implantación que las Tecnologías Convencionales de depuración, lo que puede repercutir notablemente en los costes de construcción si fuese necesaria la adquisición de los terrenos
- Larga puesta en marcha, que va desde meses hasta un año en los sistemas de Flujo Subsuperficial y hasta varios años en los sistemas de Flujo Superficial
- Los Humedales de Flujo Subsuperficial presentan riesgos de colmatación del sustrato si este no se elige convenientemente, no funcionan correctamente las etapas de pretratamiento y tratamiento primario, o si la instalación recibe vertidos anómalos con elevadas concentraciones de sólidos en suspensión o grasas
- Pérdidas de agua por evapotranspiración, lo que incrementa la salinidad de los efluentes depurados
- Posible aparición de mosquitos en los Humedales de Flujo Superficial
- Los Humedales Artificiales presentan pocas posibilidades de actuación y control ante modificaciones de las condiciones operativas, por lo que es muy importante que estén bien concebidos, dimensionados y construidos.

3.15 Modelos de diseño de los Humedales Artificiales

Para el diseño de los Humedales Artificiales se precisa conocer:

- Caudales de las aguas a tratar: caudal medio, Q_m , (m^3/d), caudal máximo, Q_{max} (m^3/h) caudal mínimo, Q_{min} , (m^3/h), estos dos últimos son precisos para el dimensionamiento del pretratamiento y del tratamiento primario.
- Concentración de las aguas a tratar: DBO_5 (mg/l) y Nt (mg/l) (si se precisa su eliminación).
- Concentración a alcanzar en las aguas tratada: DBO_5 , (mg/l) y Nt (mg/l). (si se precisa su eliminación).

- Temperatura de operación (°C): generalmente se emplea la temperatura media del mes más frío

Las principales variables para el diseño de los Humedales Artificiales son:

- El tiempo de retención hidráulica
- La profundidad del agua
- La geometría de los estanques (longitud y anchura)
- La carga orgánica superficial
- La carga hidráulica superficial

Las Tabla 10 y Tabla 11 recogen los parámetros de diseño típicos de las dos modalidades básicas de los Humedales Artificiales.

En la actualidad, los modelos más empleados para el dimensionamiento de Humedales Artificiales, tanto de Flujo Superficial como Subsuperficial, parten de la base de considerarlos como reactores de flujo pistón, que siguen cinéticas de primer orden para la eliminación de los distintos contaminantes.

Tabla 10. Parámetros de diseño de los Humedales Artificiales de Flujo Superficial

Parámetros	Valor
Tiempo de residencia hidráulico (d)	4-15
Profundidad del agua (m)	0,1-0,4
Carga orgánica (kg DBO ₅ /ha.d)	≤ 67
Carga hidráulica (m ³ /m ² .d)	0,014-0,046

Tabla 11. Parámetros de diseño de los humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial

Parámetros	Valor	
	Horizontal	Vertical
Carga orgánica (g DBO ₅ /m ² .d)	6	20
Profundidad media del sustrato (m)	0,4-0,6	0,5-0,8

3.15.1 Modelo de Reed y colaboradores

Este método, desarrollado en 1995, emplea ecuaciones en las que se consideran las constantes de reacción (por unidad de volumen), dependientes de la temperatura.

Para la eliminación, tanto de materia orgánica (DBO₅), como de amoníaco (NH₄⁺) y de nitratos (NO₃⁻), se propone el empleo de la ecuación siguiente:

Ecuación 7. Cálculo de la eliminación de contaminantes (Reed, 1995)

$$\ln \left(C_i / C_e \right) = K_t \times t$$

Donde:

C_i: concentración del contaminante en cuestión en el influente (mg/l)

C_e: concentración del contaminante en cuestión en el efluente (mg/l)

K_t: constante de reacción (d⁻¹)

t: tiempo de retención hidráulica (d)

Teniendo en cuenta que el tiempo de residencia hidráulica viene definido por la relación entre el volumen ocupado por el agua en el humedal (volumen efectivo) y el caudal de alimentación al sistema, se tiene que:

Ecuación 8. Cálculo del tiempo de retención hidráulica

$$trh = V_f / Q = S \times h \times p_s / Q$$

Donde:

V_f: volumen efectivo (m³).

Q: caudal de alimentación (m³/d).

S: superficie del humedal (m²).

h: profundidad de la lámina de agua (m). En los Humedales de Flujo Superficial esta profundidad es del orden de 0,4 m, y en los Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal oscila entre 0,4 y 0,6 m.

p_s : porosidad del sustrato filtrante (en tanto por 1). En el caso de los Humedales de Flujo Superficial la porosidad fluctúa entre 0,65 – 0,75, dependiendo del grado desarrollo de la vegetación implantada (Kadlec, 1996).

En el caso de los Humedales de Flujo Subsuperficial la porosidad varía en función del tamaño del sustrato filtrante, de acuerdo a la Tabla 12.

Tabla 12. Características de los diferentes medios empleados como sustratos en los HAFSs

Tipo de medio	Tamaño efectivo d_{10}^* (mm)	Porosidad (p_s)	Conductividad hidráulica (m/d)
Arena media	1	0,30	492
Arena gruesa	2	0,32	984
Arena pedregosa	8	0,35	4.920
Grava mediana	32	0,40	9.840
Grava gruesa	128	0,45	98.400

* d_{10} es el diámetro de una partícula en una distribución de peso de partículas que es más pequeña que todas, menos el 10% de las partículas.

La dependencia de la constante de reacción K_t con la temperatura, viene dada por la expresión:

Ecuación 9. Cálculo de la constante K_t respecto a la temperatura

$$K_t = K_r \times \theta_R \times (T_w - T_r)$$

Donde:

K_r : constante de reacción a la temperatura de referencia (d^{-1})

T_w : temperatura del agua considerada en el diseño ($^{\circ}C$) Se suele emplear la temperatura media del mes más frío

T_r : temperatura de referencia a la que se ha calculado el coeficiente θ_R que suele ser $20^{\circ}C$. ($^{\circ}C$)

θ_R : coeficiente de temperatura (adimensional)

Los valores de K_r y θ_R , para cada tipo de contaminante en cuestión, se muestran en la siguiente tabla. Donde, h_r : profundidad del lecho ocupado por la rizosfera (m)

Tabla 13. Valores de K_r y θ_R , para cada tipo de contaminante

	DBO ₅	NH ₄ (nitrificación)	NO ₃ (desnitrificación)
Humedales Artificiales de Flujo Superficial			
K_r (d ⁻¹)	0,678	0,2187	1
θ_R	1,06	1,048	1,15
Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial			
K_r (d ⁻¹)	1,104	$0,01854 + 0,3922 (h_r)^{2,6077}$	1
θ_R	1,06	1,048	1,15

Combinando las tres ecuaciones anteriores, se obtiene la superficie necesaria del Humedal Artificial a construir:

Ecuación 10. Cálculo de la superficie total del humedal (Reed, 1995)

$$S = L \times A = \frac{Q \times t}{h \times p_s} = \frac{Q \times \ln \left(C_i / C_e \right)}{K_t \times h \times p_s}$$

Donde:

L: longitud del humedal (m)

A: anchura del humedal (m)

3.15.2 Modelo de Kadlec y Knight

Este método, desarrollado en 1996, considera que en los Humedales Artificiales la proliferación de microorganismos da lugar a la producción de nueva materia orgánica, parte de la cual quedará retenida en el propio humedal, mientras que el resto saldrá del sistema, empeorando la calidad final de los efluentes. Existirán, por tanto para cada parámetro, unas concentraciones umbral mínimas por debajo de las cuales no es posible mejorar la calidad de las aguas depuradas. Dichas concentraciones umbral se encuentran dentro de los intervalos recogidos en la Tabla 14 (Kadlec, 2000).

Tabla 14. Valores umbrales para los distintos contaminantes

Parámetros	Concentraciones umbral (mg/l)
Sólidos en suspensión	1 - 6
DBO ₅	1 - 10
Nitrógeno amoniacal	< 0,5
Nitrógeno nítrico	< 0,1
Fósforo total	< 0,1

El método emplea ecuaciones en las que se consideran las constantes de reacción por unidad de superficie y no todas son dependientes de la temperatura (la temperatura sólo tiene importancia en la eliminación de sólidos en suspensión y de nitrógeno). Se trata, por tanto, de un método menos sensible a las condiciones climáticas que el método de Reed y colaboradores.

Según este modelo, la superficie necesaria de Humedal Artificial viene dada por la expresión:

Ecuación 11. Cálculo de la superficie de un humedal (Kadlec, 1996)

$$S = \frac{365 \times Q}{K_t} \times \ln \left(\frac{C_i - C^*}{C_e - C^*} \right)$$

Donde:

C*: concentración umbral (mg/l).

Los valores de los parámetros de esta ecuación se recogen en la Tabla 15. Para los sólidos en suspensión, y para las diferentes formas en que puede presentarse el nitrógeno, los valores de la constante de reacción tienen que ser corregidos en función de la temperatura empleando la Ecuación 9.

El empleo del método de Kadlec y Knight da lugar a mayores necesidades de superficie para la implantación de los Humedales Artificiales, como consecuencia de la introducción de las concentraciones mínimas umbral y del hecho de que la temperatura no influye en la eliminación de la materia orgánica

Tabla 15. Valores de los parámetros K_t , θ_R y C^* , para los distintos contaminantes

	S.S.	DBO ₅	Norg	N-NH ₄	N-NO ₃	Nt	Pt
Humedales Superficiales							
K_t (m/año)	1.000	34	17	18	35	22	12
θ_R	1,065	-	1,05	1,04	1,09	1,05	-
C^* (mg/l)	$5,1 + 0,16 C_i$	$3,5 + 0,053 C_i$	1,5	0	0	1,5	0,02
Humedales Subsuperficiales							
K_t (m/año)	1.000	180	35	34	50	27	12
θ_R	1,065	-	1,05	1,04	1,09	1,05	-
C^* (mg/l)	$7,8 + 0,063 C_i$	$3,5 + 0,053 C_i$	1,5	0	0	1,5	0,02

3.15.3 Modelo SINT (Société d'Ingénierie Nature & Technique)

En el Modelo SINT (Société d'Ingénierie Nature & Technique) se explica una combinación de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical sin Tratamiento Primario. Normalmente, esta modalidad de tratamiento precisa de dos etapas de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical. Cada una de estas etapas está constituida, generalmente, por tres Humedales, que trabajan de forma alternada, con lo que se aseguran periodos de reposo del orden de 2/3 del tiempo de operación total.

Para instalaciones que den servicio a aglomeraciones menores de 100 habitantes puede reducirse a dos el número de humedales por etapa, repartiéndose el tiempo entre operación y reposo. Para el diseño de estas instalaciones puede recurrirse al empleo de la ecuación siguiente:

Ecuación 12. Cálculo de la superficie según el modelo SINT

$$F_1 = 3,5 \times P + 0,6 \times P$$

Donde:

F_1 : superficie de la primera etapa (m²)

P: población servida (habitantes equivalentes)

La superficie de la segunda etapa es el 60% de la primera. La primera etapa de humedales, emplea como sustrato filtrante gravas finas, mientras que en la segunda se recurre al empleo de arena.

3.15.4 Otros modelos

En el año 1989, la ATV (Asociación Alemana de Saneamiento), publicó la Regla Técnica H 262, relativa al “Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Tablares”, en la que se recogen recomendaciones para el diseño y construcción de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal y de Flujo Superficial o Flujo Libre.

En este documento se recomienda que los Humedales de Flujo Horizontal se dimensionen con una superficie específica mínima de 5 m²/habitante equivalente, y que la superficie mínima del humedal sea de 25 m².

En el caso de los Humedales de Flujo Superficial se recomienda que se diseñen con un mínimo de 10 m²/habitante equivalente, cuando se empleen como tratamiento secundario.

En 1993 la Comunidad Europea y la asociación *European Water Pollution Control Association Expert Contact Group on Emergent Hydrophyte Treatment Systems*, publicaron la guía “*European Design and Operation Guidelines for Reed Bed Treatment Systems*”, que recoge directrices para el diseño y construcción de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial, tanto Horizontales como Verticales, así como orientaciones para su explotación y mantenimiento.

Esta guía recomienda que para el dimensionamiento de Humedales Artificiales de Flujo Horizontal se emplee el criterio de 5 m²/habitante equivalente, para el tratamiento de aguas residuales decantadas o procedentes de fosas sépticas con concentraciones de 150-300 mg/l de DBO₅.

3.16 Estudios de investigación y experiencias I+D sobre Humedales Artificiales en España

Entre las actuaciones de I+D, que se vienen desarrollando a nivel nacional, sobre la depuración de aguas residuales mediante el empleo de Humedales Artificiales, cabe destacar las que se llevan a cabo en las siguientes Comunidades Autónomas: Andalucía, Canarias, Castilla-La Mancha, Castilla y León, Cataluña, Comunidad Valenciana y Galicia. A continuación se reseñan las principales experiencias en cada una de ellas.

3.16.1 Andalucía

GALASA (Gestión de Aguas del Levante Almeriense S.A.), ha realizado estudios sobre el comportamiento de los Humedales Artificiales a modo de tratamiento terciario, en dos instalaciones pilotos que recibían los efluentes de una instalación de Lagunaje (EDAR de Mojácar-Garrucha-Turre), y de una instalación de Filtros de Turba (EDAR de los Gallardos).

En 1996 se inició el Proyecto de I+D “El uso de los Humedales Artificiales en la depuración de aguas residuales” cuyos principales objetivos eran:

- Analizar el potencial y la viabilidad del uso de Humedales Artificiales en la depuración de aguas residuales urbanas en las condiciones ambientales de la zona geográfica de Almería.
- Conocer, de forma experimental, el efecto que las principales variables de diseño tienen sobre algunos de los procesos básicos de la depuración como son: mineralización de la materia orgánica, eliminación de nitrógeno y retención de fosfatos.

La otra referencia a nivel andaluz donde se ha venido desarrollando estudios relativos a los Humedales Artificiales es la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC, Sevilla), instalaciones de la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua, y dentro de los cuales se desarrolla la presente tesis doctoral. El Capítulo siguiente se dedica a detallar las

investigaciones previas a la presente memoria y describir en profundidad las instalaciones de dicha Planta.



Ilustración 7. Instalación piloto a la salida del Lagunajes de Mojácar-Garrucha-Turre (Almería)



Ilustración 8. Instalación piloto en la EDAR Los Gallardos, Almería

3.16.2 Canarias

La Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, lleva a cabo investigaciones en un Humedal Artificial ubicado en el Campus Universitario de Tafira.

Las características de la unidad piloto de tratamiento son las siguientes:

- Población de diseño: 50 habitantes equivalentes
- Tecnología: Estanque Facultativo Previo, Filtros de Grava para el paso entre canales, Canales con Plantas Flotantes o Sumergidas y Filtro de Grava con Macrófitos
- Pretratamiento: no se dispone de desbaste, pasando las aguas antes de su entrada al sistema de tratamiento por una bomba dilaceradora.
- Tratamiento Secundario:
 - Estanque facultativo:
 - Superficie: 157 m²
 - Profundidad media: 1,5 m
 - Profundidad máxima: 1,8 m
 - Volumen: 235 m³
 - 2 Canales de plantas flotantes:
 - Superficie unitaria: 45 m²
 - Profundidad media: 0,8 m
 - Profundidad máxima: 1,0 m
 - Filtro de gravas con macrófitos:
 - Superficie: 45 m²
 - Profundidad media: 0,8 m
 - Profundidad máxima: 1,0 m
 - Volumen no ocupado por grava (40%): 14,4 m³
 - Volumen total: 36 m³
- Caudal máximo estimado: 7,5 m³/día

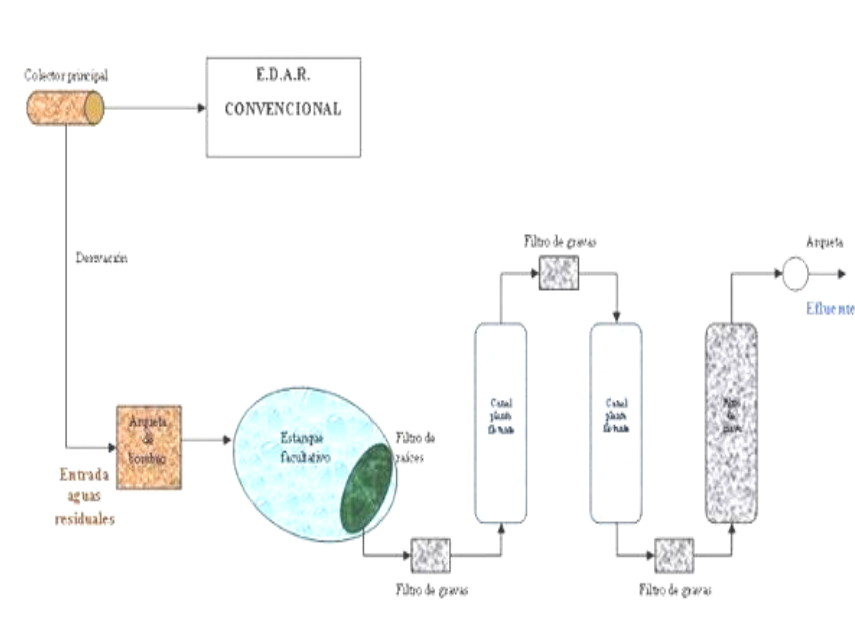


Ilustración 9. Esquema de funcionamiento de la EDAR del Campus Universitario de Tafira



Ilustración 10. Localización de la depuradora dentro de las instalaciones universitarias



Ilustración 11. Vista general del sistema de tratamiento



Ilustración 12. Estanque Facultativo



Ilustración 13. Vegetación del sistema de tratamiento: *Phragmites* y *Canna indica*

Las investigaciones realizadas se orientan, principalmente, al estudio de la eliminación de patógenos, a la influencia que ejerce sobre los rendimientos de depuración la siega de la vegetación, al estudio de la eliminación de nutrientes y al comportamiento de los Humedales Artificiales frente a aguas residuales fuertemente contaminadas.

3.16.3 Castilla-La Mancha

El Instituto de Química y Tecnología Medioambiental (ITQUIMA), (Universidad de Castilla La Mancha) desarrolla investigaciones sobre diferentes especies vegetales para estudiar su aplicación en Humedales Artificiales. Los ensayos se llevan a cabo en una instalación de tratamiento ubicada en Ciudad Real, que dispone de 5 Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal, dispuestos en paralelo. Las dimensiones unitarias de estos humedales son: 2,5 x 0,65 m, siendo el espesor del sustrato filtrante de 0,6 m.

De los cinco humedales uno se ha dejado sin plantar, a modo de testigo, y los restantes se han plantado con: *Phragmites australis*, *Lithrum salicaria*, *Cladium mariscos* e *Iris pseudacorus*.

Los números de la Ilustración 14 indican lo siguiente: 1. Depósito de alimentación. 2. Control de temperatura. 3. Bomba peristáltica. 4. Tanque de sustrato concentrado. 5. Bomba peristáltica. 6. Tanque de mezcla. 7.- Distribución de la alimentación a los humedales mediante bombas peristálticas. 8. Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal. 9. Puntos de muestreo. 10. Evacuación de efluentes

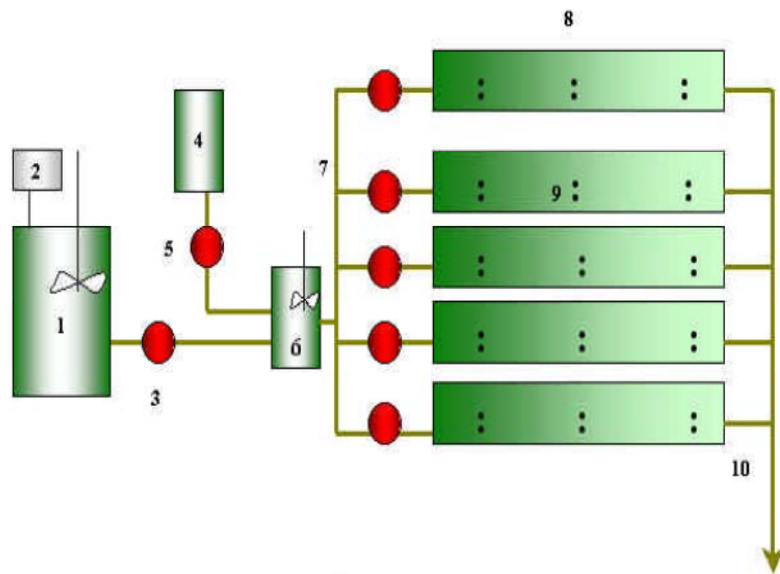


Ilustración 14. Instalación piloto en la Universidad Castilla-La Mancha

Igualmente, pero a nivel laboratorio, se investiga el tratamiento de aguas residuales industriales (industria vinícola), en Humedales Artificiales.

3.16.4 Castilla y León

El Departamento de Ecología de la Facultad de Biología de la Universidad de León realiza investigaciones sobre Humedales Artificiales en varias localidades leonesas.

En la Planta Experimental de Mansillas de las Mulas, construida en 1998, se ha comparado el comportamiento de Humedales Artificiales de Flujo Superficial y de Flujo Subsuperficial, para ello se ha trabajado con dos unidades piloto.

El Humedal de Flujo Superficial presenta una superficie de 1,1 m² y 0,6 m³ de volumen, y se ha plantado con juncos (*Scirpus lacustris*) en un sustrato de grava silícea.

El Humedal de Flujo Libre cuenta con una superficie de 3,3 m² y un volumen de 1,8 m³, y esta plantado con una combinación de aneas (*Typha sp.*), carrizo (*Phragmites sp.*) y juncos (*Scirpus sp.*). Para el enraizamiento de las plantas se recurre al empleo de una capa de gava silícea de

25 cm de espesor. En este humedal el nivel de la lámina de agua se mantiene 20 cm por encima del sustrato.

La instalación piloto cuenta con un total de 12 Humedales de Flujo Subsuperficial, similares al descrito, plantados con cuatro especies vegetales diferentes: carrizo (*Phragmites australis*), junco de laguna (*Scirpus lacustris*), lirio amarillo (*Iris pseudacorus*) y espadaña (*Typha angustifolia*).

En la Ilustración 15 se observa la Planta Experimental de Mansilla de las Mulas. En primer plano Lagunajes de alta carga, en el centro Lagunaje de Maduración y en la parte superior tanques pilotos para la experimentación con macrófitos acuáticos

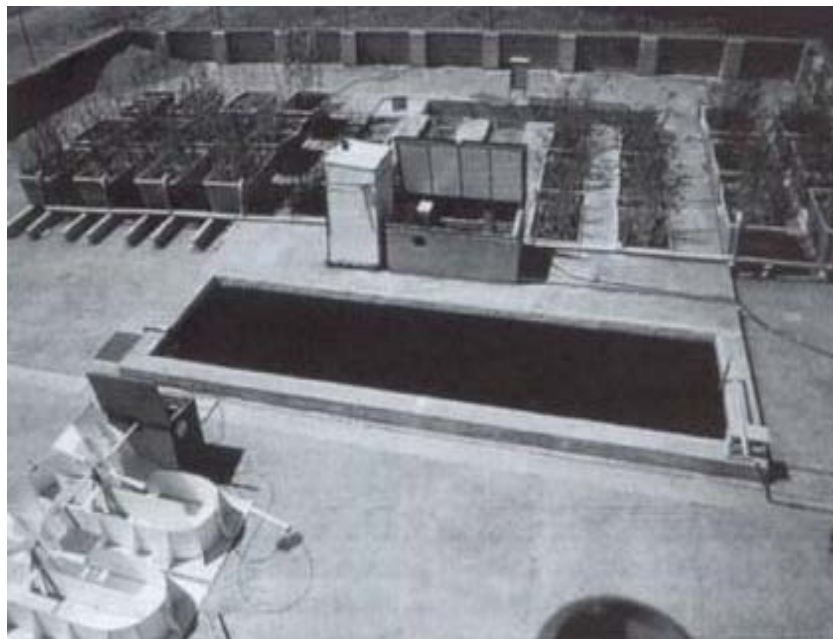


Ilustración 15. Planta Experimental de Mansilla de las Mulas

El Departamento de Ecología de la Universidad de León también ha trabajado en la depuradora de Cubillas de Oteros, que trata los vertidos de unos 150 habitantes. La estación depuradora cuenta con: reja de desbaste, laguna, Humedal de Flujo Superficial y Humedal de Flujo Subsuperficial.

El Humedal de Flujo Superficial cuenta con una superficie total de 88 m² y está plantado con *Typha latifolia*, sobre un sustrato de grava de 30 cm de espesor. El nivel de la lámina de agua se mantiene unos 40 cm por encima del nivel de la grava.

Este Humedal se ha dividido en dos partes iguales de 11 x 4 m. Una de estas partes se siega periódicamente y la otra no, al objeto de estudiar el efecto que ejerce sobre los rendimientos, especialmente en la eliminación de nutrientes, la siega periódica de la vegetación implantada en los Humedales Artificiales.

El Instituto de Investigación Medioambiental de la Universidad de León, en la localidad de Bustillo de Cea dispone de un Mosaico de Ecosistemas Artificiales (MJEAs), que cuenta con Humedales Artificiales de Flujo Superficial, plantados con *Typha latifolia* e *Iris pseudacorus*, y con Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial plantados con *Salix atrocinerea*.

En estas instalaciones, entre otras investigaciones, se ha estudiado la eliminación de organismos patógenos, y el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales, en Humedales Artificiales

3.16.5 Cataluña

El Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, de la Universidad Politécnica de Barcelona ha venido trabajando en una planta piloto de Humedales Artificiales, sita en Can Suquet (Les Franqueses del Vallès, Barcelona).

Esta planta cuenta con ocho Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal, de superficie unitaria en torno a los 50 m², y que presentan diferentes proporciones longitud/anchura, que oscilan entre: 1/1 (Humedales A1 y A2); 1,5/1 (Humedales B1 y B2); 2/1 (Humedales C1 y C2) y 2,5/1 (Humedales D1 y D2).

El tamaño empleado para el sustrato en los distintos humedales es diferente; los Humedales Tipo 1 contienen grava granítica gruesa ($D_{60} = 10$ mm, $C_u = 1,6$), mientras que los Humedales Tipo 2 contienen una grava más fina ($D_{60} = 3,5$ mm, $C_u = 1,7$).

Otra característica diferenciadora estriba en que los Humedales A, B y C presentan pendientes que oscilan entre el 0-1%, mientras que en los Humedales D la pendiente es del orden del 2,5%. Por último, en los Humedales A, B y C el espesor medio del sustrato filtrante es de 55 cm, mientras que en los Humedales D es tan sólo de 32 cm.

Todos los Humedales se plantaron con carrizo común (*Phragmites australis*), con una densidad de 3 plantas/m².

Los Humedales se alimentan con aguas residuales urbanas, tras su paso por un tanque Imhoff. El efluente del tratamiento primario se bombea a una cámara de distribución, donde se divide en ocho partes iguales que fluyen hacia cada uno de los humedales. Un caudalímetro, ubicado entre la bomba y la cámara de distribución, permite determinar los caudales de alimentación a los humedales. Estos caudales se ajustan controlando el tiempo de funcionamiento de la bomba mediante un temporizador.

Todos los Humedales cuentan con dos tubos perforados de 10 cm de diámetro, que atraviesan verticalmente el sustrato y que llegan hasta el fondo del humedal. Uno de estos tubos se dispone en la parte más cercana a la entrada del influente, y el otro se sitúa cerca de la salida. Estos tubos permiten la determinación de perfiles en profundidad de diferentes parámetros fisicoquímicos (oxígeno disuelto, potencial redox, temperatura), así como la toma de muestras de agua a distintas profundidades. Estos tubos permiten, igualmente, la realización de estudios sobre la biomasa que coloniza el sustrato. Para ello, en el interior de los tubos se introducen tubos cilíndricos de 25 mm de diámetro y 500 cm de longitud, de malla de acero inoxidable, que contienen el medio granular característico de cada lecho.

La planta piloto comenzó su operación a finales de agosto de 2001, y a lo largo de su existencia, se han llevado a cabo, entre otras, investigaciones relacionadas con:

- Los mecanismos de eliminación de la materia orgánica y de los nutrientes
- Los mecanismos de eliminación de patógenos
- El comportamiento de las sustancias malolientes presentes en las aguas residuales
- La influencia del espesor del sustrato filtrante en los rendimientos de depuración

- La influencia de alimentaciones intermitente en los rendimientos de depuración
- La evolución de los perfiles en profundidad del potencial redox
- La caracterización de la biomasa bacteriana adherida al sustrato filtrante
- La eliminación de contaminantes prioritarios en Humedales Artificiales
- La elaboración de modelos para la simulación del comportamiento de los Humedales Artificiales

En esta Universidad, pero a escala menor (contenedores plásticos de 1,1 x 0,7 x 0,4 m), se realizan investigaciones relacionadas con: la influencia del espesor del sustrato filtrante, la influencia de la siega de la vegetación en los rendimientos de eliminación de nutrientes, diferente modos de alimentación, etc.



Ilustración 16. Instalaciones piloto en la azotea de la Universidad Politécnica de Cataluña

3.16.6 Comunidad Valenciana

El Departamento de Ecología de la Universidad de Alicante estudia el empleo de diferentes tipos de vegetación para su implantación en Humedales Artificiales que operen en climas semiáridos.

Las plantas estudiadas han sido: *Phragmites australis*, *Juncus acutus*, *Juncos maritimus*, *Juncos subulatus*, *Scirpus maritimus*, *Scirpus holoschoenus* y *Typha angustifolia*, a las que se les ha aplicado lodos de depuradoras en diferentes concentraciones.

3.16.7 Galicia

El Departamento de Química Física y de Ingeniería Química de la Universidad de La Coruña, desarrolla investigaciones orientadas al empleo de digestores anaerobios como paso previo a los Humedales Artificiales. En la localidad de Os Liñares, que cuenta con unos 30 habitantes, se dispone de una instalación de tratamiento que cuenta con:

- Dos Digestores Anaerobios (UASB), de 3,6 m³ de capacidad unitaria, contruidos con anillos de hormigón de 1,2 m de diámetro y con una altura total 4 m.
- Un Humedal Artificial de de Flujo Subsuperficial Horizontal de 6 x 6 m x 0,5 m, que emplea como sustrato filtrante grava de 5-8 mm.
- Un Humedal Artificial de Flujo Superficial, que se dispone en serie con el anterior, de 6 x 6 x 0,5 m, y que recurre al empleo de 30 cm de terreno natural como sustrato para el enraizamiento de las plantas.

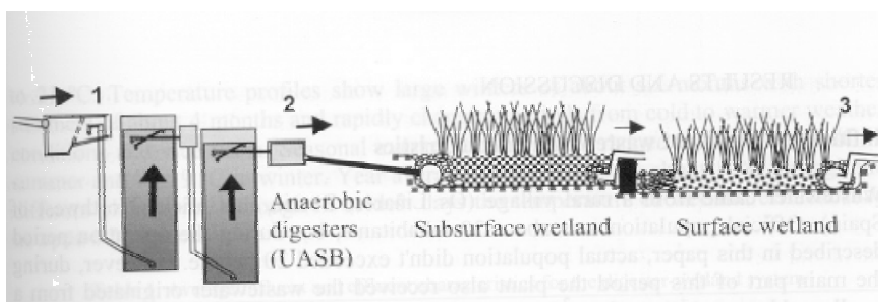


Ilustración 17. Diagrama de flujo de la instalación piloto de Os Liñares

Cerca de Santiago de Compostela se dispone de otra instalación de tratamiento, que cuenta con un Digestor Anaerobio (UASB) de 25,5 m³, al que sigue un Humedal Artificial de Flujo Superficial de 7,5 x 10,0 m, y de 0,5 m de lámina de agua. Los efluentes de este humedal alimentan una unidad de Flujo Subsuperficial de 10,0 x 7,5 m.

Ambos Humedales están plantados con juncos y como sustrato filtrante recurren al empleo de gravilla de 6-8 mm.

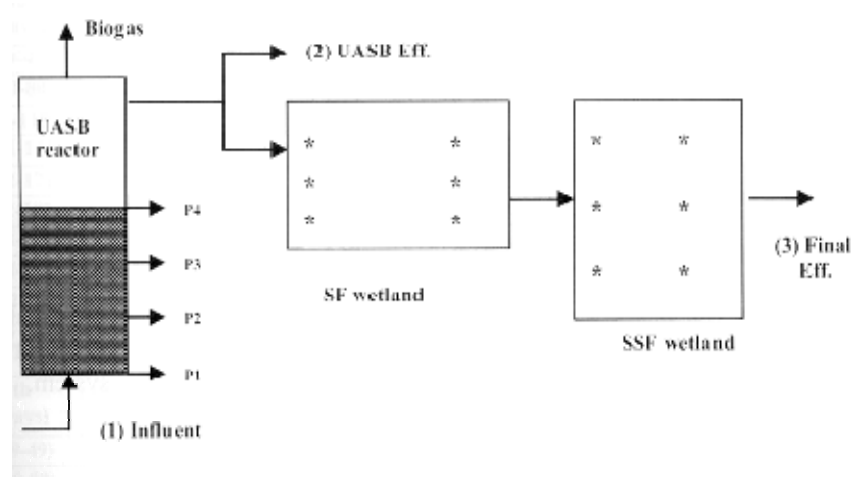


Ilustración 18. Diagrama de flujo de la instalación piloto sita en las proximidades de Santiago de Compostela

3.17 Investigaciones a nivel mundial

A nivel mundial cabe resaltar las investigaciones que sobre Humedales Artificiales se están llevando a cabo en:

- El Departamento de Ciencias Biológicas de la Universidad de Aarhus (Dinamarca), enfocadas principalmente al estudio de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical. Este departamento ha publicado la *“Danish Guidelines for Small-Scale Constructed Wetland Systems for Onsite Treatment of Domestic Sewage”*. www.au.dk/en.
- El CEMAGREF (Lyon, Francia), que orienta sus trabajos de investigación a la combinación en serie de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical, prescindiendo del tratamiento primario. Esta entidad, en colaboración con la Oficina Internacional del Agua (OIEAU), ha elaborado la Guía de la Comunidad Europea sobre “Procesos extensivos de depuración de aguas residuales, adaptados a pequeñas y medianas colectividades (500-5.000 habitantes equivalentes”. www.cemagref.fr).

Entre otras muchas universidades y centros de investigación, en los que se trabaja sobre Humedales Artificiales, en sus distintas modalidades, se encuentran:

- Institut for Water Quality and Waste Management, University of Hanover (Alemania).
- Department of Environmental and Sanitary Engineering, University of Kassel (Kassel, Alemania).
- Instituto de Limnología Ringuelet (Buenos Aires, Argentina).
- School of Environmental Engineering, Faculty of Environmental Sciences, Griffith University (Brisbane, Queensland, Australia).
- Institute for Sanitary Engineering and Water Pollution Control, University of Natural Resources and Applied Life Sciences (Viena, Austria).
- Civil Engineering Department, Federal University of Campina Grande (Paraíba, Brasil).
- Institut de Recherche en Biologie Végétale, Université de Montreal (Montreal, Canadá).
- Department of Civil Engineering, University of Waterloo (Waterloo, Ontario, Canadá).
- Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia).
- National Agricultural Research Foundation (Skalani, Creta).
- Water Research Institute, Mojmirovo nam (Brno, República Checa).
- Jiangsu Provincial Key Laboratori of Modern Agricultural Equipment and Technology, Institute of Agricultural Engineering. Jiangsu University (Jiangsu, China).
- Design Optimization and Environmental Engineering Laboratori, University of Savoier, Campus Scientifique (Le Bourget du Lac, Francia).
- Department of Civil Engineering, University of Nebraska-Lincoln, (Nebraska, Estados Unidos).
- University of Tartu, Institute of Geography (Estonia).
- Department of Microbiology, Radboud University Nijmegen (Nimega, Holanda).
- Institute of Environmental Management and Plan Sciences, Vikram University (India).
- Department of Environmental Hydrology & Microbiology, Institute for Water and Technologies, Ben-Gurion University of the Negev (Israel).
- Department of Environmental Engineering and Sustainable Development Polytechnic of Bari (Italia).
- IRIDRA S.r.l. (Florencia, Italia).

- Department of Environmental Agronomy and Vegetal Production, University of Padua (Italia).
- Environmental Protection Agency of Umbria (Perugia, Italia).
- Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology (Tokio, Japón).
- Norwegian Institute for Agricultural and Environmental Research, Soil and Environment Division (Bioforsk) (Noruega).
- Department of Hydrobiology, University of Warsaw (Varsovia, Polonia).
- Division of Biology, Department of Physics and Measurement Technology, School of Water Sciences, Cranfield University (Cranfield, Reino Unido).
- Linköpings Universitet (Linköping, Suecia).
- Department of Environmental Engineering, Chian Mai University (Tailandia).
- Environmental Engineering Department, Istanbul Technical University (Estambul, Turquía).

3.18 Grado de implantación de los Humedales Artificiales

Si bien, a nivel mundial se cuentan por miles las instalaciones existentes de Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales, destacando países como: Estados Unidos, Gran Bretaña, Dinamarca, Alemania, Bélgica, Francia, República Checa, etc. En España se asiste actualmente al despegue de esta tecnología de tratamiento, como lo demuestra el hecho de que más del 80% de los Humedales Artificiales existentes, unos 40, se han construido en los últimos 5 años, siendo la modalidad más habitual la de Flujo Subsuperficial (Puigagut, 2006).

A nivel nacional, en la implantación de Humedales Artificiales para el tratamiento de las aguas residuales destaca Cataluña. La Agencia Catalana del Agua (ACA), para el tratamiento de las aguas residuales generadas en aglomeraciones de menos de 2.000 habitantes equivalentes ha optado por la aplicación de Tecnologías no Convencionales, principalmente Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal, que en casi su totalidad están plantados con carrizo. En la actualidad la ACA gestiona una docena de estaciones con Humedales

Subsuperficiales de Flujo Horizontal, que en su mayoría emplean como desbaste una reja o tamiz y como tratamiento primario fosa séptica, tanque Imhoff o decantador, y que tratan un rango de caudales comprendidos entre 60 y 400 m³/d (Robusté, 2004).

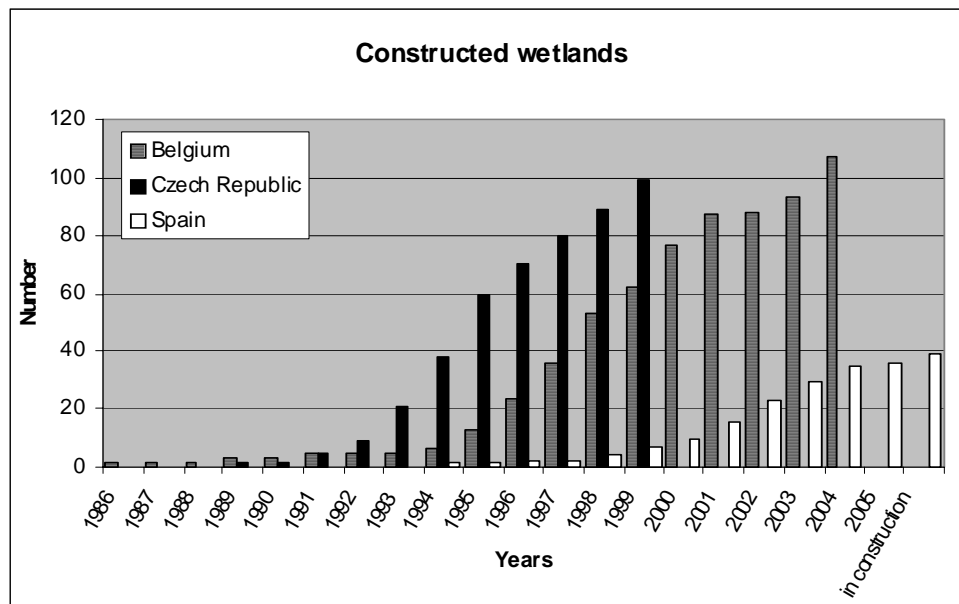


Figura 9. Evolución de los Humedales Artificiales implantados en España (Puigagut, 2006)

En lo referente a la implantación de Humedales de Flujo Superficial enfocados a la restauración y creación de nuevos ecosistemas acuáticos, cabe destacar la instalación de Empuriabrava (Gerona), que presenta una superficie de 7 hectáreas y que se encuentra integrada en el *Parc Natural dels Aiguamolls de l'Empordà*, y la de Granollers, de una hectárea de extensión, que forma parte de un parque periurbano. Se está construyendo un humedal de esta modalidad en el delta del río Llobregat, que ocupará unas 17 hectáreas.



Ilustración 19. EDAR de Verdú, 2.000 h.e. (Lérida)



Ilustración 20. EDAR de Corbins, 2.000 h.e. (Lérida)



Ilustración 21. EDAR d'Alfés (Lérida)



Ilustración 22. Humedal Artificial de Flujo Superficial de Can Cabanyes, Granollers (Barcelona)

En el caso de Andalucía, las instalaciones existentes de Humedales Artificiales son las siguientes:

- La EDAR de La Muela (Algodonales, Cádiz), que trata unos 450 habitantes equivalentes y que cuenta con 8 Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal con una superficie total de 1.180 m²
- La EDAR de Albondón (Granada), que da servicio a 800 habitantes equivalentes y que consta de dos etapas Humedales de Flujo Subsuperficial Vertical. Las aguas residuales tras su paso por una etapa previa de desbaste, pasan a una arqueta de alimentación dotada de sifón, que permite la alimentación intermitente a los tres humedales dispuestos en paralelo, que constituyen la primera etapa del tratamiento, y que en su conjunto presentan una superficie de 810 m². Los efluentes de la primera etapa se recogen en una segunda arqueta, equipada igualmente con sifón, para la alimentación intermitente a los dos humedales, dispuestos en paralelo, que constituyen la segunda etapa del tratamiento, y que presentan una superficie total de 540 m².

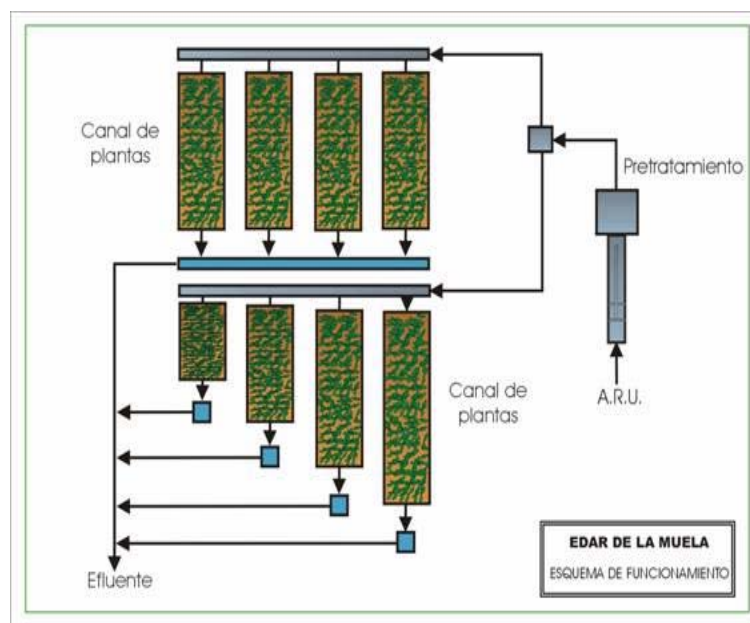


Ilustración 23. Diagrama de flujo de la EDAR de La Muela (Algodonales, Cádiz)



Ilustración 24. EDAR de La Muela (Algodonales, Cádiz)



Ilustración 25. EDAR de Albondón (Granada)

A menor escala se encuentran los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal implantados en los Albergues Juveniles de Algeciras (Cádiz) y de Cortes de la Frontera

(Málaga), a finales de la de década de los 90, con capacidades para 107 y 180 plazas, respectivamente.



Ilustración 26. EDAR del Albergue Juvenil de Algeciras (Cádiz)



Ilustración 27. EDAR del Albergue Juvenil de Cortes de la Frontera (Málaga)

CAPÍTULO II: EL PLAN I+D DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE ANDALUCÍA

CAPÍTULO II: EL PLAN I+D DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE ANDALUCÍA

1 LOS ANTECEDENTES DEL PLAN I+D DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Entre las iniciativas llevadas a cabo por la Junta de Andalucía para abordar el tratamiento de las aguas residuales, cabe destacar el apoyo que ha prestado, en el rango de las pequeñas aglomeraciones urbanas, a las denominadas Tecnologías no Convencionales (TNC).

Al asumir en el año 1984 la Junta de Andalucía algunas competencias en materia de aguas, entre ellas, las de la elaboración de los planes de saneamiento y depuración, rápidamente toma conciencia de dos aspectos relevantes: del gran número de núcleos rurales y dispersos existentes en nuestra región, y el hecho constatado de que los sistemas de depuración con cierta complejidad de manejo, al ser implantados en las pequeñas poblaciones, suelen presentar un comportamiento deficiente, achacable, fundamentalmente, a la escasez de recursos técnicos y económicos que suele ser habitual en estas aglomeraciones urbanas.

Para hacer frente a esta problemática, la aplicación de Tecnologías no Convencionales (Filtros Verdes, Humedales Artificiales, Lagunajes, Filtros de Turba) y de las posibles combinaciones entre ellas, se presentaba como una posible solución. Las características que reúnen este tipo de tecnologías: menores costes de mantenimiento y explotación, simplicidad operativa, perfecta integración medioambiental, etc., las hacían especialmente indicadas para la depuración de las aguas residuales generadas en el medio rural.

Por otro lado, el hecho de que el territorio andaluz presente unas características climáticas óptimas para el correcto funcionamiento de las Tecnologías no Convencionales, reforzaba la idea de que su implantación podría llevarse a cabo con éxito.

No obstante, y como paso previo, era preciso despejar una serie de dudas que se cernían sobre este tipo de sistemas de depuración:

- La disparidad de criterios existentes para su diseño
- La definición del rango de población óptimo para su aplicación
- Posicionamientos encontrados acerca de la eficacia de estas tecnologías

De hecho, a la hora de abordar el estudio de los fundamentos para el diseño y dimensionamiento de estos sistemas se pudo comprobar que no existía una bibliografía científica técnica precisa al respecto, observándose una gran disparidad entre los diferentes modelos aplicables.

A la vista de estos antecedentes, con el objeto de profundizar en el conocimiento las Tecnologías no Convencionales, y con miras a su posible implantación en el territorio andaluz, la Junta de Andalucía da inicio en el año 1987 al Plan de I+D de Tecnologías no Convencionales, orientado al conocimiento de las particularidades del diseño, mantenimiento y explotación de este tipo de tecnologías.

Como paso previo a la implantación de estas tecnologías alternativas se pusieron en marcha una serie de actuaciones, con los objetivos de:

- Comprobar experimentalmente su grado de eficiencia
- Verificar *in situ* los posibles problemas operacionales
- Establecer ventajas y desventajas.

De acuerdo con este planteamiento, el Plan de I+D de Tecnologías no Convencionales se estructuró en tres fases:

PRIMERA FASE: en ella se establecieron las bases del Plan, definiéndose su alcance, objetivos, dotación económica, duración etc., y se llevó a cabo un exhaustivo estudio de las condiciones de aplicación de los diferentes procesos de depuración no Convencionales, apoyándose en una revisión de la información publicada sobre los mismos y en un conjunto de visitas llevadas a cabo a realizaciones existentes en distintos países (Israel, Francia, etc.).

Igualmente, en esta Fase se procedió a la implantación de una Planta Experimental, concebida con el objetivo de obtener experiencias concretas aplicables a la realidad del territorio andaluz, y para poder comprobar la validez de los criterios de diseño disponibles en la bibliografía sobre las Tecnologías no Convencionales.

Para la ubicación de una Planta Experimental se precisaba una población que representase fielmente las características del medio rural andaluz. Tras un proceso de selección, se optó por el municipio sevillano de Carrión de los Céspedes, distante 28 km de la capital, con una población entorno a los 2.000 habitantes y con un bajo nivel de industrialización. Todas estas características se ajustaban al perfil de municipio buscado para la implantación del centro experimental.

Inicialmente, se instaló en la Planta un amplio abanico de Tecnologías no Convencionales a escala piloto: Filtro Verde, Humedal Artificial, Lagunaje, Contactores Biológicos Rotativos y Lechos Bacterianos, con capacidades de tratamiento que oscilaban entre los 10 y los 50 m³/día. La posibilidad de interconexión entre las diferentes tecnologías implantadas enriquecía el espectro de investigaciones a llevar a cabo.

SEGUNDA FASE: en el transcurso de esta segunda Fase se procedió a una Tipificación de Efluentes en los municipios y localidades susceptibles de acoger este tipo de tecnologías, y al desarrollo del Plan Piloto, que contemplaba la implantación de depuradoras a escala real en distintos municipios andaluces.

El propósito de tipificar los efluentes de los núcleos rurales era conocer en detalle la carga y particularidades de las aguas residuales a las que tendrían que dar respuesta las depuradoras no convencionales, estableciendo, no sólo sus valores absolutos, sino también sus fluctuaciones de caudal y carga.

Para ello, se procedió a una clasificación de los núcleos urbanos de Andalucía de menos de 25.000 habitantes, en base a la información disponible sobre: población, ubicación (litoral, interior), grado de industrialización, etc. Del total de municipios se seleccionaron 20

representativos, en los que a lo largo de un año se realizaron tres campañas de aforo y muestreo.

Por su parte, con el Plan Piloto se pretendía aplicar a escala real los resultados obtenidos en las investigaciones llevadas a cabo en los diferentes sistemas de depuración instalados a escala reducida en la Planta Experimental, para su contraste. Dentro del Plan de I+D se procedió a la construcción de cinco Plantas Piloto, que, junto al beneficio que suponían al depurar las aguas residuales de los municipios donde se implantaron, aportaron datos para realizar ajustes en los parámetros de diseño obtenidos en la Planta Experimental.

Una vez construidas, las Plantas se sometieron a un seguimiento exhaustivo, al objeto de validar la idoneidad de los criterios de diseño adoptados en su día.

TERCERA FASE: el Plan concluía con la elaboración del Plan Director de Tecnologías no Convencionales, en el que se recogía toda la experiencia acumulada en las dos fases anteriores, se evaluaba la factibilidad de aplicación de las diferentes Tecnologías no Convencionales en los pequeños municipios andaluces, se definían los costes de instalación/explotación de las mismas y las tarifas subsiguientes, y se analizaba las posibilidades de su financiación.

El Plan I+D de Tecnologías no Convencionales se distingue por su visión estratégica, su perspectiva de futuro y por su apuesta por tecnologías diferentes de las más conocidas, para resolver los problemas de depuración de los vertidos urbanos generados en las pequeñas aglomeraciones, haciendo esta iniciativa andaluza pionera no sólo en España, sino en toda Europa.

Este Plan no sólo ha situado a Andalucía a la cabeza del conocimiento y el desarrollo de este tipo de tecnologías, sino que también ha permitido evitar muchos errores en infraestructuras de depuración urbana, lo que conlleva un mejor rendimiento de la inversión pública, y pone de relieve como la investigación es siempre una inversión rentable y de futuro.

En la actualidad, más de 20 años después del comienzo de esta iniciativa, de las 705 estaciones depuradoras que dan servicio a 8.400.000 habitantes equivalentes en Andalucía, 276

instalaciones, que depuran el 90% de esta población, se basan en Tecnologías Convencionales, mientras que el resto, 429 estaciones, son sistemas basados en Tecnologías no Convencionales, cuyo grado de eficiencia y funcionalidad es similar, y en ocasiones superior, al de las instalaciones convencionales (CENTA, 2008).

No cabe duda que, a la vista de estos resultados, la implantación de este tipo de tecnologías en Andalucía, así como la aplicación de los resultados del plan de I+D iniciado en 1987, pueden considerarse como una experiencia muy positiva.

Por otra parte, es preciso tener en cuenta que, a lo largo de estos años, los esfuerzos realizados para dar cumplimiento a lo establecido por la Directiva 91/271/CEE sobre depuración de aguas residuales urbanas, ha posibilitado que casi la totalidad de la población equivalente andaluza ubicada en núcleos de más de 2.000 h.e. esté servida con su correspondiente sistema de saneamiento y depuración. Sin embargo, los núcleos por debajo de 2.000 h.e en su mayoría carecen de un tratamiento adecuado, lo cual habrá que resolver en un futuro inmediato.

Otra cuestión a considerar es que estos 20 años de experiencia han hecho posible avanzar mucho en el conocimiento sobre diversas tecnologías de fitodepuración, especialmente en lo que respecta a los Humedales Artificiales. Los criterios para su diseño y dimensionamiento, las características técnicas de construcción, los procedimientos para su correcto manejo y operación son mucho más sólidos que al inicio.

Esto hace que este tipo de sistemas se planteen como una alternativa adecuada a la resolución de diversas situaciones: como tratamiento secundario principal, como tratamiento terciario o de afino, como recuperación ambiental y paisajística, etc.

Igualmente, los conocimientos que se tienen a cerca de estos sistemas hacen intuir que son una de las soluciones más válidas para resolver la depuración urbana en núcleos de menos de 2.000 habitantes.

Sin embargo, en España, en 2005 (fecha que se comienza el Plan) tan sólo se contaba con unas cuarenta instalaciones de Humedades Artificiales, la mayoría de ellas en Cataluña,

mientras que en Andalucía sólo se disponía de cuatro estaciones las cuales en global, tan sólo tratan unos 1.500 habitantes equivalentes (Puigagut, 2006).

La necesidad de establecer soluciones adecuadas para la depuración de los núcleos urbanos de menos de 2.000 habitantes equivalentes, los resultados obtenidos en las numerosas instalaciones de Humedales Artificiales repartidas por todo el mundo, su escaso grado de implantación en Andalucía y el hecho de disponer de una plataforma científico técnica como la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC), justificó la conveniencia de poner en marcha un Plan I+D de Humedales Artificiales en Andalucía, al objeto de promover, de forma planificada, la implantación de este tipo de tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas andaluzas

2 EL PLAN I+D DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN ANDALUCÍA

El Plan I+D de Humedales Artificiales en Andalucía se pretendió articular de forma similar al Plan I+D de Tecnologías no Convencionales, pero con las siguientes salvedades:

- Como paso inicial se procedió a una revisión del estado del arte actual de la tecnología de Humedales Artificiales.
- En la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC) ya se encontraban implantadas todas las modalidades existentes de Humedales Artificiales.
- Tras más de veinte años de vigencia del Plan I+D de Tecnologías no Convencionales se tiene un amplio conocimiento de los caudales y cargas de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas andaluzas.
- Se hacía preciso acometer un estudio sobre la integración social de las actuaciones a llevar a cabo.

De acuerdo con estas consideraciones, el Plan I+D de Humedales Artificiales en Andalucía se estructura de la forma siguiente (Ilustración 28).



Ilustración 28. Fases del Plan I+D de Humedales Artificiales en Andalucía

2.1 Revisión del estado del arte de la tecnología de Humedales Artificiales

Se procedió a recopilar toda la información disponible sobre Humedales Artificiales, en lo referente a los aspectos siguientes:

- Fundamento de este tipo de tecnologías.
- Modalidades existentes de Humedales Artificiales.
- Rangos poblacionales para la aplicación de los Humedales Artificiales.
- Condiciones climáticas para la aplicación de los Humedales Artificiales.
- Modelos de diseño para las distintas modalidades de Humedales Artificiales.
- Características constructivas de las distintas modalidades de Humedales Artificiales.
- Rendimientos medios de depuración que se alcanzan con las distintas modalidades de Humedales Artificiales.
- Estudios de investigación y experiencias I+D sobre Humedales Artificiales.
- Grado de implantación de este tipo de tecnología en regiones de clima similar al andaluz.

2.2 Investigaciones en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes

La PECC cuenta en la actualidad con un total de seis Humedales Artificiales, en los que se encuentran representadas las distintas modalidades existentes, Humedales de Flujo Superficial y Humedales de Flujo Subsuperficial, tanto Horizontales como Verticales.

El hecho de que estos humedales se hayan construido con diferentes espesores de sustrato, que los sustratos empleados sean diversos y que los humedales puedan disponerse en distintas configuraciones serie-paralelo, permite el desarrollo de un amplio abanico de investigaciones sobre esta tecnología de tratamiento.

Las investigaciones que forman parte de la presente Memoria de Tesis se han realizado dentro del desarrollo de esta fase del Plan I+D de Humedales Artificiales de Andalucía. Dicho Plan se está llevando a cabo por la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua por encargo de la Agencia Andaluza del Agua.

2.3 Estudio de integración social de los Humedales Artificiales

Los objetivos de este estudio se centraron en:

- Realización de un diagnóstico de la incidencia potencial de la implantación de Humedales Artificiales.
- Análisis de la información, percepción y receptividad de la población de los núcleos seleccionados para la implantación de las Plantas Piloto de Humedales Artificiales.
- Propuesta de mecanismos de participación ciudadana en la toma de decisiones relativas a la implantación de los nuevos Humedales Artificiales.
- Establecimiento de mecanismos para la elaboración de una estrategia de difusión de los Humedales Artificiales como tecnología de tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas.
- Mejorar la articulación de todos los actores (técnicos, científicos, instituciones públicas, empresarios, trabajadores, usuarios), implicados en el diseño, puesta en marcha y mantenimiento de los nuevos Humedales Artificiales a implantar.

2.4 Plan Piloto de Humedales Artificiales

Actualmente es en esta fase donde se está trabajando dentro del Plan I+D. Se procederá a la ubicación y diseño de un conjunto de Plantas Piloto, basadas en Humedales Artificiales, en aglomeraciones urbanas andaluzas suficientemente representativas, que aporten una serie de

datos que permitan ajustar los parámetros de diseño determinados en la PECC, y que otro lado, supongan el beneficio de depurar las aguas residuales de los núcleos en que se implanten.

Posteriormente, se realizará un seguimiento de los humedales incluidos en el Plan Piloto, que permitirá determinar:

- Los rendimientos medios de depuración que se alcanzan para las distintas modalidades de humedales.
- La influencia de las condiciones externas.
- Los requisitos y costes de la explotación y el mantenimiento.
- El volumen y características de los residuos que se generan en el proceso de tratamiento (lodos y biomasa vegetal).

2.5 Plan Director de Humedales Artificiales

Este documento, que recogerá toda la información y experiencia acumuladas en las fases anteriores, planificará la posible aplicación de los Humedales Artificiales, en sus distintas modalidades, para el tratamiento de las aguas residuales de las pequeñas aglomeraciones urbanas andaluzas, definiendo los costes totales de su implantación así como los costes asociados de explotación y mantenimiento.

3 LA PLANTA EXPERIMENTAL DE CARRIÓN DE LOS CÉSPEDES (PECC)

Además de todos sus logros, el Plan I+D de Tecnologías no Convencionales posibilitó el disponer de un centro de investigación y experimentación único en Europa: la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC).

La PECC ha sido pieza clave para el desarrollo del Plan, y ha proporcionado un soporte indispensable para poder alcanzar el grado de implantación de Tecnologías no Convencionales del que hoy disponemos en la región andaluza.

De los 21.000 m² iniciales que ocupaba la PECC en el momento de su inauguración en el año 1990, se ha pasado a los 41.000 m² actuales y a disponer de capacidad para el tratamiento de la totalidad de las aguas residuales generadas en el municipio, gracias a la reciente ampliación llevada a cabo con fondos FEDER, en el marco del desarrollo del Convenio de Investigación suscrito entre la Agencia Andaluza del Agua y la Fundación CENTA.

En la actualidad, la Planta Experimental cuenta con:

- Una obra de llegada en la que se dispone un Pretratamiento integrado por: Desbaste (manual y automático), Desarenador-Desengrasador Aireado, Clasificador de Arenas y Concentrador de Grasas. Las aguas pretratadas se bombean a un Sistema de Distribución elevado, desde el que, por gravedad, se alimentan los distintos sistemas de tratamiento implantados en la PECC. Cada una de estas alimentaciones cuenta con su correspondiente medidor de caudal.
- Un Filtro Verde, que ocupa una parcela de 2.000 m², dividida en dos zonas de igual extensión. En una de esta parcelas se han plantados chopos (*Populus euroamericana*) en un marco de 5 x 5 m, mientras que la otra se ha destinado a eucaliptos (*Eucalyptus camaldulensis*), con un marco de 3 x 3 m. En este sistema se evalúa, entre otros factores: la tasa de crecimiento de las especies arbóreas seleccionadas al ser regadas

con aguas residuales; la mejora en la operatividad del sistema en función de los diferentes sistemas de alimentación empleados; la posibilidad de alimentación con efluentes procedentes de otros sistemas de tratamiento, etc.

- Seis unidades de Humedales Artificiales, que ocupan una extensión total de 1.500 m² y que constituyen hoy día el punto focal de las investigaciones que se llevan a cabo en la PECC, al estar representadas todas las modalidades de esta tecnología (Flujo Libre, Flujo Subsuperficial horizontal y vertical, y sus posibles combinaciones), y al hacer usos de sustratos de naturaleza y granulometría diversa. Las investigaciones sobre fitodepuración que se realizan sobre los humedales se centran en: la evaluación del abatimiento de patógenos y de la eliminación de carga orgánica y de nutrientes; el estudio de la relación entre los rendimientos de depuración y los factores constructivos y de operación (especies vegetales implantadas, sustratos empleados, modalidades de alimentación, posibles combinaciones), etc. En el siguiente apartado se profundizará en su descripción.
- Un sistema de Lagunaje, integrado por dos Lagunas Anaerobias (que funcionan en paralelo), una Laguna Facultativa y dos Lagunas de Maduración, que pueden operar en serie o en paralelo. El Lagunaje ocupa una extensión total de unos 4.000 m², y presenta un volumen variable gracias a la posibilidad de regulación de los niveles de salida de las distintas lagunas. En este sistema, además de investigar su comportamiento bajo diferentes condiciones operativas, se desarrollan diversos proyectos de investigación relacionados con: el abatimiento de patógenos; la eliminación de nutrientes; la caracterización de zoo y fitoplancton presente en las distintas lagunas, etc.
- Seis Filtros de Turba en los que se investigan diferentes modalidades de alimentación, características de las turbas a emplear, combinaciones con otros sistemas de tratamiento, etc.
- Sistemas de biopelícula: se dispone de una amplia variedad de sistemas de depuración de película fija, con diferentes capacidades de tratamiento, en los que actualmente se vienen desarrollando investigaciones sobre elementos bioindicadores en dichos

procesos. Entre estos sistemas se encuentran dos Lechos Bacterianos, dos Contactores Biológicos Rotativos y una Rueda Aireada.

- Diferentes sistemas de depuración convencional instalados por casas comerciales: Aireaciones Prolongadas con y sin eliminación de nutrientes, Lechos Fluidizados, Biorreactores de Membrana, Reactores que emplean Biocatalizadores, etc., y tratamientos terciarios para el afino de los efluentes.
- Parcelas de ensayo para experiencias de reutilización en riego con los efluentes depurados procedentes tanto, de las Tecnologías Convencionales, como de las no Convencionales.

Las instalaciones de la Planta se completan con un laboratorio completamente equipado, una sala de conferencias con capacidad para 50 personas, dotada de medios audiovisuales y una estación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología. En breve, la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua, va a proceder a completar estas instalaciones con un nuevo edificio multifuncional y a la reestructuración de algunos de los sistemas experimentales más antiguos.

Por tanto, hoy por hoy se dispone de una magnífica herramienta para seguir avanzando en el conocimiento de las diferentes tecnologías de depuración, ensayando modelos que sean más sostenibles y que se adapten lo mejor posible a las circunstancias de cada caso.

El hecho de que el contexto actual invite a planear una revisión de los resultados del Plan de I+D de Tecnologías no Convencionales para establecer su grado de vigencia, la necesidad de establecer soluciones adecuadas para la depuración de los núcleos urbanos de menos de 2.000 h.e., los resultados obtenidos en las investigaciones sobre sistemas basados en Humedales Artificiales y el hecho de disponer de una plataforma científico técnica como la PECC, llevaron a plantear la conveniencia del desarrollo del Plan Andaluz de I+D sobre Humedales Artificiales.



Ilustración 29. Foto aérea de la PECC en el 2009



Ilustración 30. Lagunaje de la PECC (2009)



Ilustración 31. Filtros de Turba de la PECC (2009)

4 INSTALACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN LA PECC

A continuación se describen los distintos sistemas implantados en la PECC basados en la tecnología de depuración de Humedales Artificiales.

4.1 Escorrentía superficial o canal de plantas emergentes

El primer sistema de Humedales Artificiales instalado en la PECC se implantó a principios de los 90 (por entonces se le denominaba a la tecnología como escorrentía superficial) y constaba de un canal impermeabilizado de 60 m de longitud y 1 m de ancho. Dicho canal estaba dotado de una pequeña pendiente para favorecer el discurrir de las aguas a depurar. Inicialmente, en la cabecera (primeros 30 m), se plantaron juncos (*Scirpus sp.*) sobre capas inertes de arena y grava, y en el tramo final aneas (*Typha sp.*) sobre grava.



Ilustración 32. Primera instalación piloto de Humedales Artificiales en la PECC

Los juncos plantados en cabecera presentaron un desarrollo deficiente, no llegando a colonizar totalmente el espacio disponible y sufriendo un progresivo deterioro, por lo que se decidió

eliminar este cultivo y poner en su lugar carrizo (*Phragmites*). Para ello, y tras acondicionar el fondo del canal con arena, se procedió al enterramiento de rizomas con una longitud media de 10 cm y con una densidad de siembra de unos 7 rizomas/m², encontrándose desde entonces una adecuación y desarrollos excelentes, compitiendo con ventaja con las eneas.

El esquema del funcionamiento se muestra en la Ilustración 33.

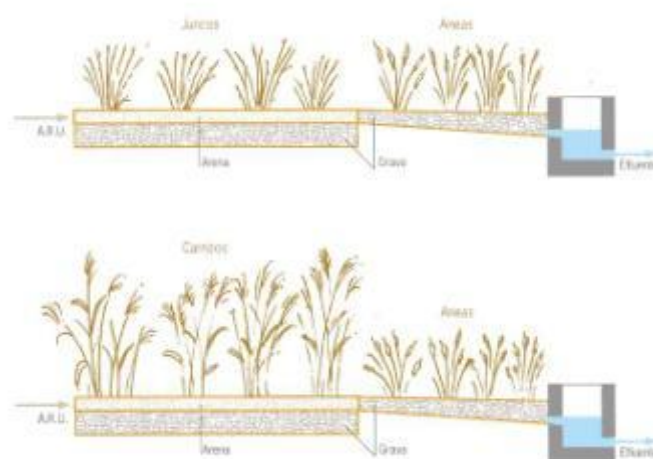


Ilustración 33. Esquema de funcionamiento de instalación piloto en la PECC (COPT, 1999)

Los caudales de agua residual con los que se alimentó este sistema variaron entre 3 y 6 m³/d, para los períodos invernal y estival respectivamente.

El sistema operó correctamente con cargas de 0,05 y 0,1 m³/m lineal de canal, para las situaciones de invierno y verano respectivamente.

Una vez finalizado el ciclo vegetativo del carrizo (finales de octubre), y de las eneas (principios de agosto), se procedió a la recolección de la biomasa seca, ya que de no retirarse se produciría la liberación del nitrógeno y fósforo almacenado, al medio líquido. Esta recolección favoreció, igualmente, el desarrollo de los nuevos brotes.

Este Humedal quedó fuera de servicio hace unos años debido a que los rizomas del carrizo perforaron el vaso del canal (construido en arcilla compactada), lo que provocaba que el agua escapase lateralmente hacia un arroyo vecino antes de llegar al final del sistema.

4.2 Prototipo "DBV, Filtro Vertical, modelo V8"

El primer prototipo instalado en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC) de flujo vertical, se corresponde con el equipo "DBV, Filtro Vertical, modelo V8", que la firma Ekoplant S.L. comercializaba para la depuración de las aguas residuales de las pequeñas colectividades.

Para la instalación del Humedal se hizo uso de un depósito prefabricado de un diámetro de 5,0 m y una altura total de 1,2 m (superficie unos 20 m²).



Ilustración 34. Instalación del sistema piloto DBV modelo V8

Como paso previo se procedió a la excavación de un nicho circular, en el que se ubicó el depósito, de forma que éste sobresale del suelo unos 10 cm.

En el fondo del depósito se dispuso una tubería de drenaje, recubierta con fibra de coco y conectada a un tubo de respiración. La tubería de drenaje se embutió en una capa de grava de tamaño medio. Sobre esta capa se dispuso una capa de gravilla, que sirviera de soporte a una capa de arena. Por último, sobre la arena se dispuso una delgada capa de grava de tamaño medio, que favorecía el reparto de la alimentación.



Ilustración 35. Fotografías del montaje de las tuberías de drenaje del sistema piloto

Las plantas (*Phragmites australis*) se trajeron directamente desde Alemania, plantándose un total de 75 cepellones.

Como etapa previa al Humedal se dispusieron dos depósitos: uno plástico que hace las veces de Decantador-digestor (de 500 l de capacidad) y otro de hormigón que actúa como Arqueta de bombeo. La unidad piloto se alimenta con agua residual desbastada (a 3 cm), tamizada (a 1 mm) y desengrasada, que vierte en el Decantador-Digestor, que está dotado en su parte superior de un Filtro de arlita, que es atravesado en sentido ascendente por las aguas decantadas. Tras su paso por el Filtro de arlita las aguas vierten en la Arqueta de bombeo, en la que se ubica una bomba sumergible (175 l/min) comandada por sonda de nivel. La actuación de la sonda se ajusta, para que el total del caudal influente diario se envíe al humedal a impulsos.



Ilustración 36. Decantador – Digestor con filtro de arlita

Las aguas bombeadas se conducían a tuberías concéntricas de polietileno, dispuestas sobre la superficie del Humedal, con perforaciones en su parte inferior, que proporcionan un reparto uniforme de las aguas.



Ilustración 37. Tubería de alimentación del sistema piloto

Las aguas filtradas se recogían en la tubería de drenaje inferior y se conducían hacia una tubería flexible, dispuesta en el interior de un depósito plástico, que hace las veces de Arqueta de salida. Al ser flexible la tubería de salida se podía modificar el grado de encharcamiento del sustrato.



Ilustración 38. Arqueta de salida

Por problema de cotas fue preciso ubicar en el depósito de salida una bomba sumergible (125 l/min), accionada por sonda de nivel, para la evacuación de los efluentes depurados hacia una de las redes de evacuación de efluentes de la Planta Experimental.

La instalación se completaba con un cuadro de control, que albergaba un programador que permitía conocer los tiempos de funcionamiento de las bombas de alimentación y de evacuación de los efluentes depurados, y por ende, los caudales de alimentación y los caudales de aguas depuradas.



Ilustración 39. Vista general del Humedal con la vegetación ya desarrollada

4.3 Prototipo de la empresa Optimia Medio Ambiente S.L.

El sistema en fase de experimentación implantado en la PECC por Optimia Medio Ambiente S.L es el sistema *Humart Bi-Filtre®*. Se trata de un Humedal de Flujo Vertical en el que se combina en el mismo espacio dos etapas, consiguiendo un importante ahorro de superficie (1,5 m² por habitante equivalente).

En la primera etapa un filtro de grava elimina principalmente los sólidos en suspensión y parte de la materia orgánica. Esta etapa se corresponde con la capa superficial del lecho cuya granulometría se expone a continuación:

- Sustrato de gravas 2–6 mm
- Sustrato de gravas 12–25 mm
- Sustrato de gravas gruesas 30–60 mm con ventilación con red de tubos de drenaje

Al tratarse de un humedal plantado, parte de la oxigenación del lecho se debe a la actividad biológica de las plantas. La especie plantada es el carrizo (*Phragmites australis*).

En la segunda fase (capa inferior) se completa el tratamiento mediante procesos de nitrificación-desnitrificación. En esta segunda etapa el material de relleno presenta la siguiente granulometría:

- Sustrato de arena 0–4 mm
- Sustrato de gravas 2–6 mm
- Sustrato de gravas 15–20 mm para drenaje, destinado a reestablecer la horizontalidad, en el que se sitúa una red de tubos de drenaje

La acción radicular favorece el tratamiento de afino de las aguas residuales. La red de tubos de salida o drenaje/ aireación (en PVC) dentro del sistema Humart Bi-Filtre® es doble:

- Sobre el fondo del depósito de PRFV en el que se encuentra implantado el sistema
- Sobre la arena del primer sustrato de la segunda etapa filtrante
- Cada tubo de drenaje de ambas redes se conecta a una chimenea de ventilación del mismo diámetro.

El caudal medio tratado es de 5 m³d⁻¹. La alimentación con agua pretratada se realiza en discontinuo (5–7 pulsos diarios). En la PECC se han instalado dos humedales de flujo vertical de doble etapa, operando de forma alterna y discontinua. Los ciclos tienen una duración de 3–4 días: mientras que uno se encuentra en fase de alimentación, el otro humedal se encuentra en fase de reposo que permite la aireación del sustrato.

El sistema está dotado de un equipo de control remoto que provee de información en tiempo real y posibilita el ajuste de parámetros de operación a distancia. La energía para la alimentación tanto del equipo de control remoto como de la bomba de alimentación es renovable pues el sistema está dotado de dos paneles solares y un aerogenerador.



Ilustración 40. Vista general del Humedal de la empresa Optimia Medio Ambiente S.L.

4.4 Prototipo de la empresa Macrofitas S.L.

Macrofitas S.L. es la empresa licenciataria en exclusiva de la patente FMF: Filtro de Macrofitas en Flotación. Este dispositivo ha sido instalado sobre la superficie de reactores de aireación y clarificadores secundarios para el tratamiento terciario de las aguas residuales. No obstante, en la PECC el sistema FMF está siendo aplicado como tratamiento secundario de aguas residuales pre-tratadas (desbastadas, desarenadas y desengrasadas).

Las plantas macrófitas se colocan de manera flotante en las balsas construidas a tal efecto. Los sistemas radiculares se entrelazan formando una isla flotante en la superficie, constituyéndose así el filtro FMF.

Estas plantas bombean el oxígeno directamente del aire a través de sus hojas hasta el sistema radicular gracias a las membranas que poseen. Este bombeo continuo de oxígeno permite el desarrollo de bacterias aerobias que degradan la materia orgánica, eliminándola sin producir olores ni fangos. Además, las plantas macrófitas absorben directamente nitratos y fósforo para su crecimiento y desarrollo. Incluso en algunas partes de su estructura fijan minerales y metales pesados, consiguiendo asimismo la eliminación de coloides.

Otra de las ventajas del sistema es la importante reducción de organismos patógenos debido a la presencia de depredadores en la rizosfera de las plantas. El sistema se caracteriza por un bajo consumo energético y labores de mantenimiento simples, que no requieren mano de obra especializada. La superficie requerida es de 0,25 a 3 m por cada habitante equivalente. El tiempo de retención varía entre 2,5 y 5 días. Las especies plantadas pueden ser *Phragmites spp.* o *Typha spp.* y el marco de plantación es de 4 plantas por metro cuadrado.



Ilustración 41. Vista general del Humedal de la empresa Macrofitas S.L.

4.5 Los Humedales Artificiales objeto del estudio

Es con la ampliación de la PECC en el año 2005 cuando se alcanza la mayor representatividad de modalidades de sistemas de Humedales Artificiales. Se construyen 6 nuevos prototipos, uno de ellos de Flujo Superficial y los otros cinco de Flujo Subsuperficial. De estos últimos dos de Flujo Vertical y los otros tres Horizontales.

Como estos sistemas son los utilizados en la investigación, objeto de esta memoria, se describen en el Capítulo III de Material y Método, ya que su diseño, dimensionamiento y construcción forman parte de la experimentación objeto de esta tesis.

CAPÍTULO III: MATERIAL Y MÉTODO

CAPÍTULO III: MATERIAL Y MÉTODO

En este Capítulo se describe tanto el material utilizado en la investigación como la metodología utilizada para la obtención de los datos.

1 PLAN DE MUESTREO Y ANÁLISIS

Para el estudio objeto de esta memoria se ha procedido a la elaboración de un Plan de muestreo y análisis. En éste se han fijado los puntos y procedimientos de muestreos, la frecuencia y duración de los mismos, los parámetros a determinar y el método analítico elegido para cada determinación.

1.1 La toma de muestras y mediciones *in situ*

Los puntos de muestreo elegidos son los siguientes:

- Agua bruta: es el agua de entrada a la Planta Experimental. Procede del núcleo poblacional de Carrión de los Céspedes (Sevilla).
- Agua de salida del tanque Imhoff, se muestrea este punto con el fin de determinar la carga real de entrada a los diferentes Humedales así como evaluar el grado de eficiencia en la eliminación de contaminantes del propio tanque Imhoff.
- Agua efluente de cada uno de los Humedales, se toma una muestra de la salida de cada uno de los distintos Humedales Artificiales.

La frecuencia del muestreo es semanal. El día de muestreo se efectúan tres tomas puntuales de dichas corrientes, en intervalos regulares de tiempo, procediéndose al final de la jornada a la composición de muestras integradas.

Coincidiendo con los momentos de las tomas de muestras, se procede, con el auxilio de equipos de medida de campo, a la determinación de los valores de pH, Conductividad y Oxígeno Disuelto en los distintos puntos de muestreo.

1.2 Determinaciones analíticas físico químicas

Para caracterizar las aguas residuales se han empleado un conjunto de parámetros que sirven para cuantificar los contaminantes típicos. Los parámetros de uso más habitual, y aquí utilizados, son los siguientes:

- *Sólidos en suspensión*: sólidos que no pasan a través de una membrana filtrante de un tamaño determinado (0,45 micras). Dentro de los sólidos en suspensión se encuentran los sólidos sedimentables (que decantan por su propio peso) y los no sedimentables.
- *Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO₅)*: cantidad de oxígeno (mg/l), necesaria para oxidar biológicamente los componentes de las aguas residuales. En el transcurso de los cinco días de duración del ensayo (cinco días), se consume aproximadamente el 70% de las sustancias biodegradables.
- *Demanda Química de Oxígeno (DQO)*: cantidad de oxígeno (mg/l) necesaria para oxidar los componentes del agua recurriendo a reacciones químicas.
- *Nitrógeno*: se presenta en las aguas residuales en forma de nitrógeno orgánico, amoniacal (fundamentalmente) y de nitratos y nitritos. La concentración de este parámetro se ha expresado como nitrógeno total, el cual se obtiene mediante la suma de todas sus formas.
- *Fósforo*: en las aguas residuales aparece principalmente como fosfatos orgánicos y polifosfatos. Se ha medido la concentración de fósforo total.

Los métodos analíticos empleados para la caracterización de las muestras tomadas son los que recoge el *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WPCF, 2000), se resumen en la Tabla 16.

Tabla 16. Parámetros analizados y métodos de referencia

PARAMETROS	DESCRIPCION	UNIDADES	REFERENCIA
Temperatura	Termometría	° C	S.M. 2550 B
pH	Electrometría		S.M. 4500 H+ B
Conductividad	Electrometría	μS/cm	S.M. 2510 B
Oxígeno disuelto	Electrometría	mg/l	S.M. 4500-O G
Sólidos en suspensión	Residuo no filtrable a 0,45 mm, secado a 103-105 °C.	mg/l	S.M. 2540 D
DBO ₅	Determinación electrométrica de O ₂ disuelto antes y después de incubación de 5 días a 20±1 °C, en la oscuridad.	mg/l	S.M. 5210 B
DQO	Método del dicromato potásico, reflujo cerrado y valoración titulométrica.	mg/l	S.M. 5220 C
N amoniacal	Electrometría	mg/l	S.M. 4500-NH ₃ G
N nítrico	Electrodo Selectivo	mg/l	S.M. 4500 NO ₃ C
NTK	Macro-kjeldhal	mg/l	S.M. 4500-N B
Fósforo total	E.A.M. con ácido ascórbico tras digestión ácida.	mg/l	S.M. 4500-P B

S.M.: Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WPCF, 2000).

E.A.M.: Espectrofotometría de Absorción Molecular.

La relación entre distintos parámetros de medida de la materia orgánica tales como DQO y DBO₅ nos da idea de la proporción de materia orgánica biodegradable que contiene el agua residual. Normalmente se asume la siguiente relación (Hernández, 1995).

Si $DBO_5/DQO \geq 0,4$ se corresponde con aguas residuales muy biodegradables

Si DBO_5/DQO está entre 0,2 y 0,4 se corresponde con aguas residuales biodegradables

Si $DBO_5/DQO \leq 0,2$ nos indica que las aguas residuales son poco biodegradables

Algunos valores de esta relación recogidos en la bibliografía se exponen en la Tabla 17 (Crites, 1998; Metcalf, 1991; Kadlec, 2009).

Tabla 17. Valores de la relación DBO₅/DQO

	DBO ₅ /DQO
<i>Crites (1998)</i>	
Agua bruta	0,3 - 0,8
Agua residual después de tratamiento primario	0,4 - 0,6
<i>Metcalf (1991)</i>	
Agua bruta	0,4 - 0,8
<i>Kadlec (2009)</i>	
Efluente humedal (Missouri)	0,21 - 0,23
Efluente humedal (Arizona)	0,05 - 0,06
Efluente humedal (Michigan)	0,05

2 PARÁMETROS DE CONTROL

2.1 Medida de los caudales

Para medir los caudales aplicados a cada uno de los sistemas pilotos del presente estudio se instalaron caudalímetros electromagnéticos a la entrada de cada uno de ellos. El registro del caudal de entrada se ha contralado diariamente por el personal de mantenimiento de las instalaciones.

2.2 Tiempo de Retención Hidráulica

El Tiempo de Retención Hidráulico es aquel que transcurre entre que el agua entra y sale del sistema. Se obtiene del cálculo de dividir el volumen de agua contenida en el sistema (sólo es aplicable a los humedales de flujo horizontal y a los de flujo libre, ya que son los únicos que permanecen en carga hidráulica constantemente) entre el caudal de alimentación.

2.3 Cálculos de las cargas

Las unidades que conforman los sistemas de depuración son por un lado el tanque Imhoff y por otro los distintos Humedales Artificiales. En el caso del primero, los parámetros operacionales son la Carga Orgánica Volumétrica y el Tiempo de Retención Hidráulico. Para los humedales se maneja la Carga Orgánica Superficial, la Carga Superficial de Sólidos y la Carga Hidráulica.

2.3.1 Determinación de la Carga Orgánica Superficial

Este parámetro operativo se define como la cantidad de materia orgánica, medida en DBO_5 , que se aplica por unidad de superficie del sistema. La Carga Superficial se obtiene de dividir la

cantidad de DBO_5 que entra en el Humedal por la superficie del mismo. En nuestro caso las superficies de los distintos Humedales se describen en apartados posteriores. La DBO_5 que se toma como dato de alimentación del Humedal es la referente a la salida del tanque Imhoff.

Ecuación 13. Cálculo de la Carga Orgánica Superficial

$$Carga\ Orgánica\ Superficial = g\ DBO_5 / m^2 \times d$$

2.3.2 Determinación de la Carga de Sólidos Superficial

Es la cantidad de sólidos en suspensión que se aplican sobre el Humedal por unidad de superficie de éste.

Ecuación 14. Cálculo de la Carga de Sólidos Superficial

$$Carga\ de\ Sólidos\ Superficial = g\ SST / m^2 \times d$$

2.3.3 Determinación de la Carga de Nutrientes Superficial

Es similar el cálculo que en apartado anterior pero utilizando la concentración presente de cada uno de los nutrientes estudiados (nitrógeno y fósforo).

Ecuación 15. Cálculo de la Carga de Nitrógeno Superficial

$$Carga\ de\ Nitrógeno\ Superficial = g\ N / m^2 \times d$$

Ecuación 16. Cálculo de la Carga de Fósforo Superficial

$$Carga\ de\ Fósforo\ Superficial = g\ P / m^2 \times d$$

2.3.4 Determinación de la Carga Hidráulica Superficial

La Carga Hidráulica de un sistema se define como el caudal diario que le entra al mismo por unidad de superficie. La Carga Hidráulica se obtiene de dividir el volumen de alimentación al sistema por la superficie del mismo.

Ecuación 17. Cálculo de la Carga Hidráulica Superficial

$$\text{Carga Hidráulica Superficial} = \frac{m^3}{m^2 \times d}$$

3 TOMA DE DATOS DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA

La Planta Experimental de Carrión de los Céspedes cuenta con una estación de la Agencia Estatal de Meteorología del Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino.

Se recogen diariamente datos referentes a temperaturas máximas y mínimas, velocidad y dirección del viento, precipitación, evaporación y horas de sol.

La existencia de estos datos *in situ* permite contrastar el comportamiento de los sistemas de depuración con unas condiciones meteorológicas concretas.



Ilustración 42. Vista general de la Estación Meteorológica de la PECC

4 PROTOTIPOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN

En este apartado se describen todos los elementos utilizados en la investigación objeto de la presente tesis: el Pretratamiento, el tanque Imhoff y los 6 Humedales Artificiales.

4.1 Características del Pretratamiento

El Pretratamiento instalado en la PECC cuenta con los siguientes elementos:

- Desbaste:

- Desbaste automático:

- Reja de 3 cm de paso

- Tamiz de 3 mm de paso

- Desbaste manual (en paralelo):

- Reja de 2 cm de paso

- Desarenado-Desengrasado:

- Desarenador-Desengrasador aireado de puente móvil

- Clasificador de arenas

- Concentrador de grasas

El agua una vez pretratada es conducida hacia una cámara de bombeo y de aquí, mediante bombas sumergibles, es enviada a un sistema de distribución. Éste consiste en un depósito de 18 m³ de volumen útil, equipado con sondas de nivel y con once salidas hacia los distintos sistemas de tratamiento. Cada salida dispone de un caudalímetro electromagnético. Desde una de las salidas el agua es conducida hacia el tanque Imhoff.



Ilustración 43. Vista general del Pretratamiento

4.2 Características del tanque Imhoff

Como paso previo a los Humedales Artificiales, y con objeto de minimizar el riesgo de colmatación de los sustratos, se dispuso de una etapa de tratamiento primario basada en el empleo de tanque Imhoff. Para una mayor versatilidad del sistema se adoptó que se dispusieran de dos tanques Imhoff semienterrados, que operarán en paralelo, y con una capacidad unitaria de tratamiento de $25 \text{ m}^3/\text{d}$. Las dimensiones de cada uno de ellos son de 3 m^3 en la zona de decantación y de 15 m^3 en la de digestión.

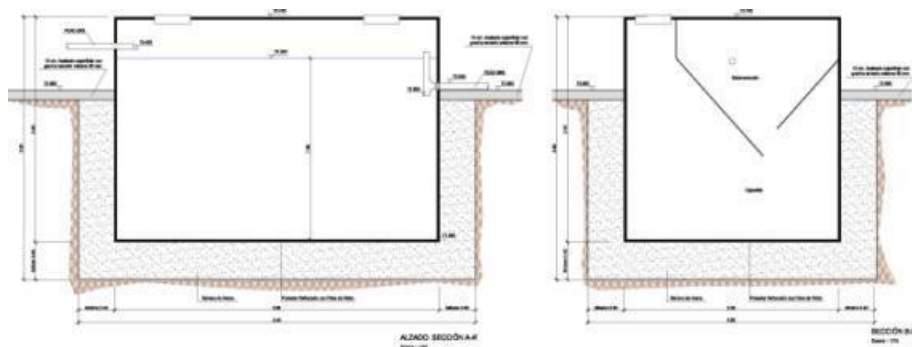


Ilustración 44. Secciones del tanque Imhoff

4.3 Características constructivas de los Humedales Artificiales

Este apartado se centra, de manera general, en la descripción de los diferentes aspectos constructivos que definen a los Humedales Artificiales objetos del desarrollo de las investigaciones.

4.3.1 El confinamiento

Los 6 Humedales Artificiales se han construido por excavación en el terreno. En los Humedales de Flujo Subsuperficial el fondo presenta una pendiente del orden del 1% en la dirección entrada-salida; ésta pendiente es algo menor en el de Flujo Superficial. Con relación a los taludes tienen un ángulo de unos 45° en los de Flujo Subsuperficial y más suaves en el de Flujo Superficial.



Ilustración 45. Vaso de uno de los Humedales Artificiales



Ilustración 46. Perfilado de los taludes de un Humedal Artificial

4.3.2 La impermeabilización

Un requisito de suma importancia era lograr que el vaso de los humedales fuera estanco, para que no se produjeran fugas de agua, que pudieran contaminar el subsuelo por infiltración. Para la impermeabilización, se ha optado por el empleo de polietileno de alta densidad (PEAD). Para evitar que la lámina pudiera ser perforada por las raíces y rizomas de las plantas, o dañadas por los propios áridos, el espesor elegido ha sido de 2,5 mm.

Para evitar punzamientos, tanto por piedras presentes en el terreno, como por el propio sustrato filtrante, por debajo y por encima de la lámina plástica se ha dispuesto de una lámina de geotextil de 150 - 300 g/cm².

Como es habitual en la impermeabilización mediante lámina plástica, se ha controlado exhaustivamente las soldaduras entre láminas (por aire caliente en nuestro caso) y el buen anclaje de las mismas al terreno. Para dicho anclaje se ha recurrido al empleo de grapas metálicas.

La corona del talud se ha recubierto en todo su perímetro con una escollera de piedra. Ésta tiene la función de evitar que se pueda desprender con el tiempo la capa impermeabilizante (geotextil y lámina plástica).



Ilustración 47. Colocación de una lámina de geotextil en un Humedal Artificial



Ilustración 48. Vista de un Humedal Artificial tras finalizar la etapa de impermeabilización



Ilustración 49. Detalle de la sujeción de la lámina plástica mediante grapa metálica

4.3.3 La evacuación de los efluentes depurados

En el Humedal de Flujo Superficial las aguas, tras recorrer longitudinalmente todo el Humedal, se evacúan al exterior. En los Humedales de grandes extensiones se recomienda que la evacuación tenga lugar por varios puntos, para evitar en lo posible, la creación de caminos preferentes. En nuestro caso, al no ser de dimensiones elevadas, se ha optado por un único punto de vertido. Para el control del nivel del agua se ha empleado una tubería flexible en la arqueta de salida, para minimizar el escape de flotantes se ha implantado una chapa deflectora en la zona de evacuación de efluentes.

En los Humedales de Flujo Subsuperficial la evacuación de los efluentes es diferente según se trate de Humedales Horizontales o Verticales. En los Horizontales, para la evacuación de las aguas depuradas, se ha dispuesto en el fondo de una tubería de drenaje embutida en una zona de bolos gruesos (50-100 mm). El drenaje conecta con una tubería final flexible, ubicada en la arqueta de evacuación de efluentes. Esta tubería permite modificar el nivel de encharcamiento del sustrato, estableciéndose el mismo unos 5 cm por debajo de la superficie del sustrato.



Ilustración 50. Chapa deflectora en el Humedal Artificial de Flujo Superficial



Ilustración 51. Tubería de drenaje para la evacuación en un Humedal Flujo Horizontal



Ilustración 52. Detalle del enlace de las tuberías de drenaje con la tubería de salida



Ilustración 53. Recubrimiento de las tuberías de evacuación de efluentes



Ilustración 54. Tubería de evacuación de efluentes conectada a las tuberías de drenaje

En el caso de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical los efluentes, tras atravesar verticalmente el sustrato, son recogidos por un conjunto tuberías de drenaje dispuestas en el fondo del Humedal, que descargan en la arqueta de salida. Estas tuberías quedan embutidas en una capa de grava de unos 25-40 mm de tamaño.



Ilustración 55. Conjunto de tuberías de drenaje para la evacuación en un Humedal de Flujo Vertical



Ilustración 56. Tuberías de drenaje conectadas con la arqueta de salida en un Humedal de Flujo Vertical



Ilustración 57. Tuberías de drenaje cubiertas con una capa de grava en un Humedal de Flujo Vertical



Ilustración 58. Recubrimiento de las tuberías de drenaje por el fondo de un Humedal de Flujo Vertical



Ilustración 59. Detalles de las tuberías de evacuación de efluentes en la arqueta de salida

4.3.4 La ventilación del sustrato filtrante

En el caso de los Humedales de Flujo Subsuperficial Vertical, para favorecer la oxigenación del sustrato, se han conectado a las tuberías de drenaje unas chimeneas, que sobresalen por encima del medio filtrante y que ejercen un efecto de tiro y renovación del aire.



Ilustración 60. Colocación de las chimeneas de ventilación en un Humedal Artificial de Flujo Vertical



Ilustración 61. Detalle de las chimeneas de ventilación en un Humedal Artificial de Flujo Vertical

4.3.5 Las capas de áridos: análisis granulométrico

Es el caso de los Humedales de Flujo Superficial, para el enraizamiento de la vegetación se puede recurrir al empleo tanto de tierra vegetal como de áridos (grava 4-12 mm. en nuestro caso). Dado que este tipo de humedales la circulación del agua es básicamente a través de los tallos de las plantas, y en muy poca medida a través del sustrato, éste no juega un papel destacado.

Por el contrario, en los Humedales de Flujo Subsuperficial las capas de áridos que forman el sustrato filtrante constituyen la parte esencial del sistema de tratamiento, dependiendo de su rigurosa selección y adecuada colocación el buen funcionamiento del humedal, puesto que uno de los mayores riesgos de este tipo de humedales es la posible colmatación del medio filtrante. En los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal el tamaño de los áridos que se ha empleado oscila entre 3-8 mm en el caso del Humedal número seis y 12-20 mm para el número dos.



Ilustración 62. Penetración de los rizomas y raíces en el sustrato

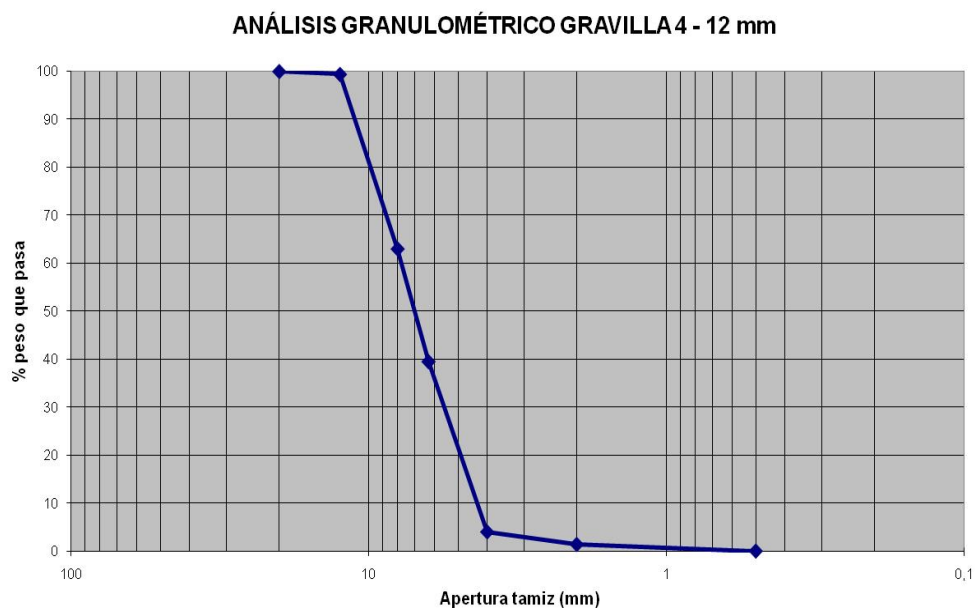
En los Humedales Artificiales de Flujo Vertical, para el sustrato filtrante se ha utilizado grava de 4-12 mm y 25-40 en el caso del número uno, y de 3-8, 4-12 y 25-40 mm para el número tres.

A la hora de la selección del sustrato filtrante para la Humedales Artificiales es imprescindible disponer de un material suficientemente homogéneo en forma y tamaño (bajos coeficientes de uniformidad), y limpio (sin presencia de finos, lo que puede hacer necesario el lavado el material procedente de la cantera). Un material con elevado contenido en finos se puede colmatar fácilmente, acortando la vida útil del sistema.

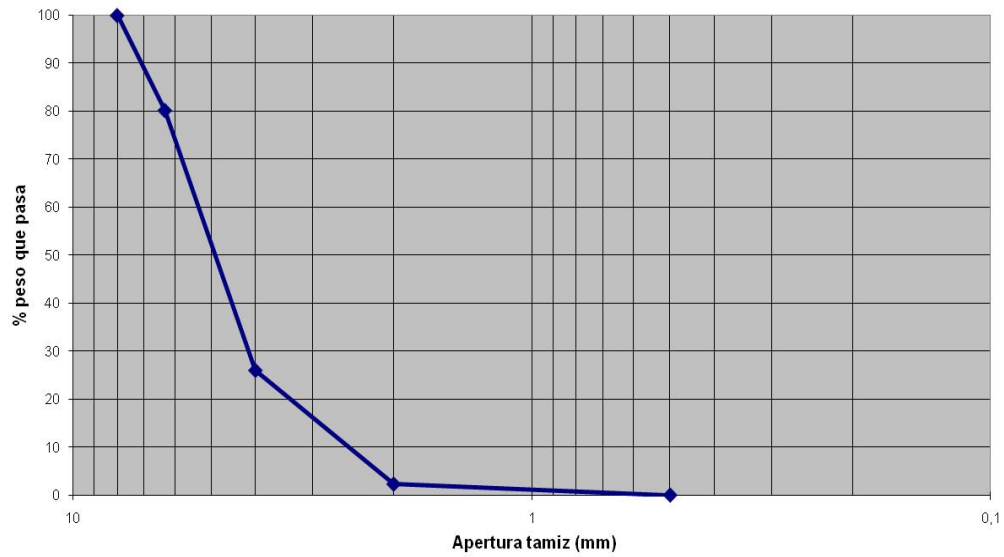
Para la correcta disposición y control de los áridos se le encargó a la empresa suministradora de los mismos que realizara los correspondientes análisis y comprobaciones con el fin de garantizar la homogeneidad y fiabilidad en la colocación de los áridos. A continuación se exponen los resultados de los mismos.

Para la colocación del sustrato en el interior de los Humedales se ha recurrido a métodos manuales y mecánicos, en todo caso se ha procurado no dañar la lámina impermeabilizante, ni los sistemas de drenaje, ni de ventilación.

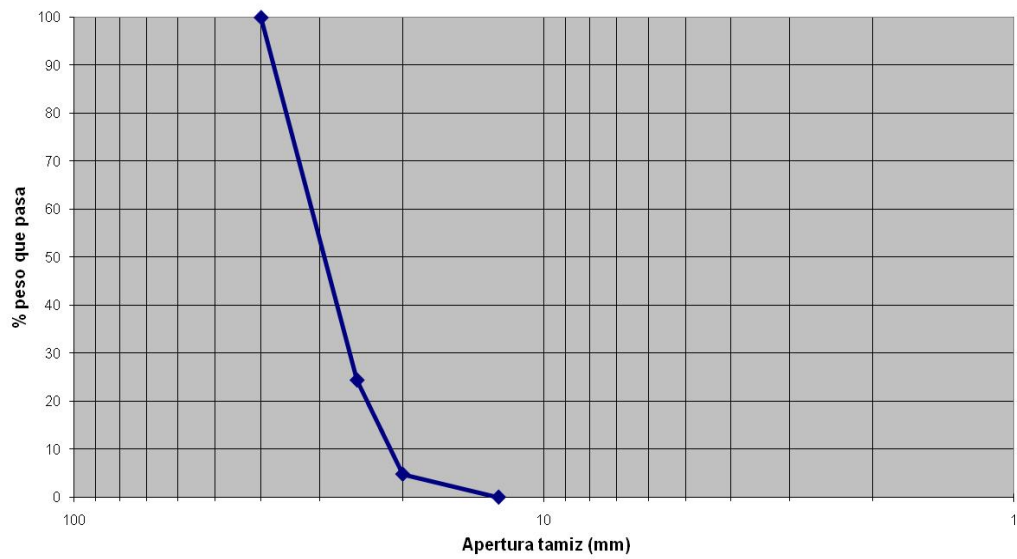
Un resumen de los datos referentes a la tipología y granulometría del sustrato de cada Humedal se expone en apartados posteriores.



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO GRAVILLA CALIZA 3 - 8 mm



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO GRAVA 25 - 40 mm



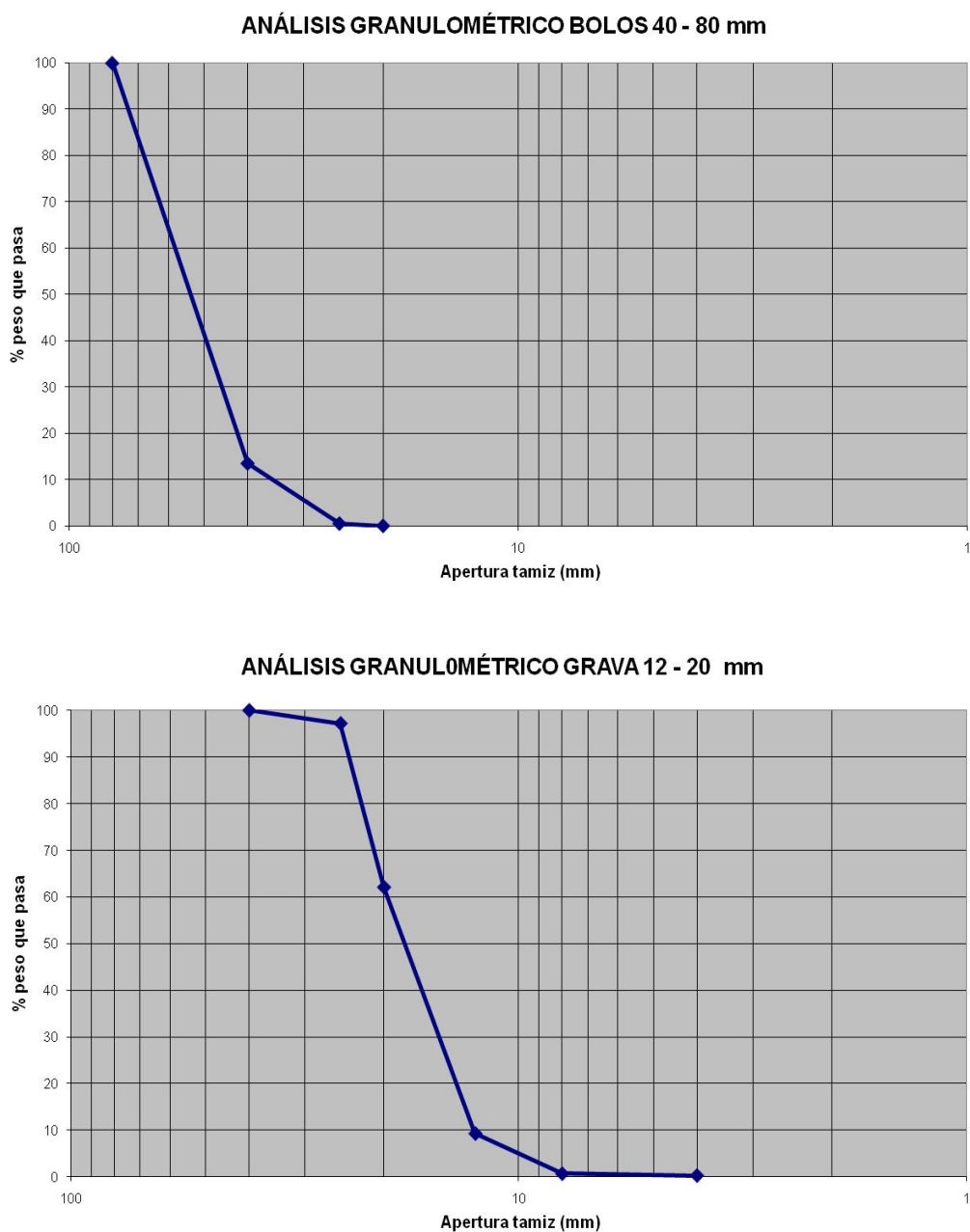


Figura 10. Ensayos de granulometría de los distintos sustratos



Ilustración 63. Descarga directa de áridos en el interior de un Humedal Artificial



Ilustración 64. Descarga de áridos mediante cubilete en un Humedal Artificial



Ilustración 65. Distribución mecánica de los áridos en un Humedal Artificial de Flujo Horizontal



Ilustración 66. Distribución manual de áridos en un Humedal Artificial

4.3.6 El sistema de reparto de las aguas a tratar

Para lograr un buen funcionamiento hidráulico de los Humedales Artificiales, de forma que todo su volumen permanezca activo y evitar así la aparición de caminos preferenciales, es preciso que la alimentación de los mismos se efectúe de la forma más uniforme posible.

En el Humedal Artificial de Flujo Superficial se ha utilizado una única tubería de alimentación. En el caso de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal se ha recurrido al empleo de tuberías perforadas, que descargan sobre una zona de bolos gruesos (50-100 mm), dispuesta en cabecera del Humedal, que permite la distribución uniforme de las aguas. El gran tamaño de estos áridos minimiza los problemas de obstrucción.



Ilustración 67. Tuberías de reparto en un Humedal Artificial de Flujo Horizontal

En los Humedales Artificiales de Flujo Vertical se ha recurrido también al empleo de tuberías perforadas, que descargan las aguas, de forma uniforme, por toda la superficie de los Humedales.

En este tipo de Humedales la alimentación debe efectuarse de forma intermitente, intercalándose los periodos de alimentación al Humedal con periodos de reposo. Para lograr esta alternancia en

la alimentación, se ha optado por la instalación de una electroválvula temporizada para cada uno de ellos.



Ilustración 68. Tuberías para el reparto de la alimentación en un Humedal Artificial de Flujo Vertical

4.3.7 La plantación

En el caso del Humedal de Flujo Superficial se ha recurrido a la implantación de varias especies vegetales: juncos, aneas y juncia. Para su pronto crecimiento se adquirieron en vivero.

En el caso de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial la especie vegetal empleada ha sido el carrizo (*Phragmites australis*), que presenta las siguientes ventajas:

- Perfecta adaptación a las condiciones hídricas de explotación de los humedales.
- Buena transferencia de oxígeno desde las partes aéreas hasta los rizomas y raíces, lo que favorece el desarrollo de bacterias en su entorno.
- Buena resistencia a la alternancia de periodos de alimentación y de reposo.
- Infiltración favorecida por el desarrollo de tallos a través de los que percola el agua, lo que reduce los riesgos de colmatación.
- Fácil adaptación a la altitud (salvo alta montaña) y a climas diversos.

- Mayor duración del ciclo vegetativo, permaneciendo activo durante un período de tiempo superior al de otras plantas emergentes.



Ilustración 69. Aspecto del Humedal de Flujo Superficial recién plantado



Ilustración 70. Aspecto del Humedal de Flujo Superficial al año de su plantación

El establecimiento de la vegetación en los Humedales Artificiales puede realizarse recurriendo al empleo de plantas procedentes de viveros, o mediante multiplicación vegetativa a partir de los rizomas, que es el método más habitual, y para lo que se procede al troceado de los mismos en fragmentos de unos 5 cm de longitud, que se plantan en el sustrato con una densidad de unos 5 trozos/m². Con esta densidad de plantación se consigue la cobertura total del humedal en aproximadamente un año.

En este estudio se ha optado por los dos métodos, en el caso del Humedal número 1 se procedió a la compra de plantones procedentes de vivero y en los otros Humedales plantados se ha procedido a la siembra con trozos de rizomas de carrizos del arroyo cercano. Dos de los Humedales se dejaron sin plantar para poder comparar el efecto de la presencia o ausencia de vegetación.



Ilustración 71. Planta de *Phragmites australis* procedente de vivero



Ilustración 72. Distribución de las bandejas con plantas a lo largo del HV1



Ilustración 73. Detalle de Humedal Artificial tras su plantación con plantas de vivero



Ilustración 74. Humedal Artificial al año de su plantación



Ilustración 75. Trozos de rizomas de *Phragmites australis* preparados para su plantación

4.4 Características generales de los Humedales Artificiales

Se han implantado un total de seis Humedales Artificiales:

- Dos de Flujo Subsuperficial Vertical (HV1 y HV3),
- Tres de Flujo Subsuperficial Horizontal (HH2, HH5 y HH6), y
- Uno de Flujo Superficial (H4).

El diseño y las dimensiones de cada uno de ellos se describen a continuación.

4.4.1 Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical

Los dos Humedales de Flujo Subsuperficial Vertical son de sección rectangular y presentan una superficie de 317 m² (23,5 x 13,5 m), en el caso del Humedal HV1, y de 288 m² (24 x 12 m) para el Humedal HV3. En ambos Humedales la pendiente del fondo es del 1%, hacia la zona de salida. El volumen ocupado por los humedales se ha impermeabilizado con lámina plástica de polietileno de alta densidad (PEAD) de 2,5 mm de espesor, colocada sobre geotextil de 180 g/cm².

En cuanto al sustrato, el HV3 presenta una capa inferior de 15 cm de espesor de grava 25-40 mm, en la que se encuentra la red de drenaje, sobre ella se ha dispuesto una capa de gravilla, de tamaño 4-12 mm, y de 60 cm de espesor.

En el HV3 se ha dispuesto una capa inferior de grava 25-40 mm y de 15 cm de espesor, en la que se distribuye la red de drenaje, y sobre ella se dispone una serie de capas de áridos: 10 cm de gravilla de 4-12 mm, 30 cm de gravilla caliza de 3-8 mm y, finalmente, 30 cm de gravilla de 4-12 mm.

En el fondo de cada Humedal, y embutidas en una capa de grava 25-40 mm y de 15 cm de espesor, se han instalado cinco tuberías de drenaje, de 125 mm de diámetro, dispuestas longitudinalmente y que finalizan en la arqueta de recogida de efluentes depurados.

Para favorecer la oxigenación del sustrato de los Humedales, cada tubería de drenaje cuenta con tres chimeneas, distribuidas equidistantemente, y que sobresalen 1 m verticalmente sobre el sustrato, al objeto de potenciar la circulación de aire por las tuberías.

De los dos Humedales, tan sólo se ha procedido a la plantación del HV1, empleando para ello *Phragmites australis*. Las plantas procedían de vivero y se ha implantado con una densidad de 5 plantas/m².

Para la alimentación de los Humedales se han dispuesto cinco tuberías longitudinales de polietileno, de 32 mm de diámetro, con orificios de salida de 1 cm de diámetro cada 1,80 m. Las tuberías descansan directamente sobre el sustrato, manteniéndose la misma separación entre ellas.

Los efluentes, tras atravesar verticalmente el sustrato, son recogidos por las tuberías de drenaje, que descargan en la arqueta de salida. Un conjunto de válvulas, dispuestas en esta arqueta, permite enviar los efluentes depurados a cauce, o alimentar con los mismos a otro de los humedales existentes.

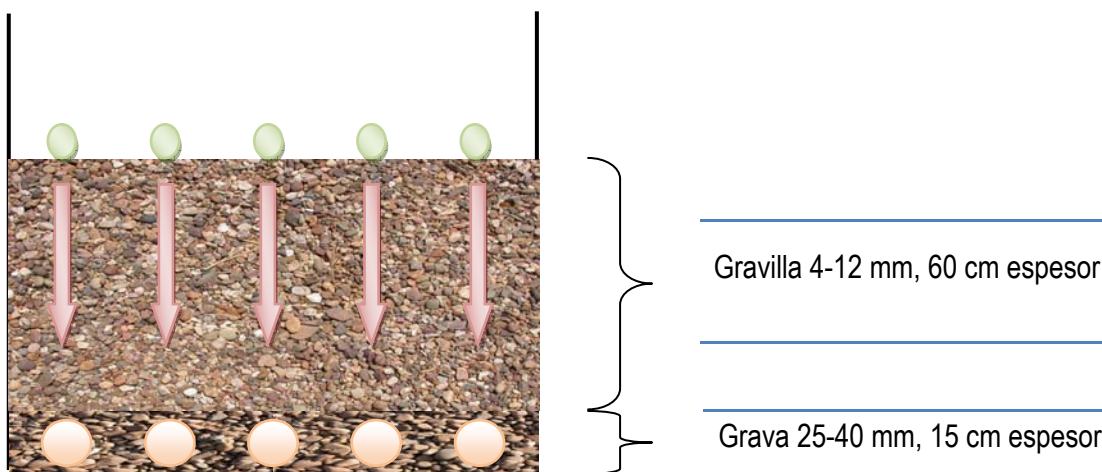


Ilustración 76. Características del sustrato del Humedal Artificial de Flujo Vertical HV1

En una segunda etapa a este humedal se le añadió en superficie una capa de 5 cm de arena 1-2 mm.

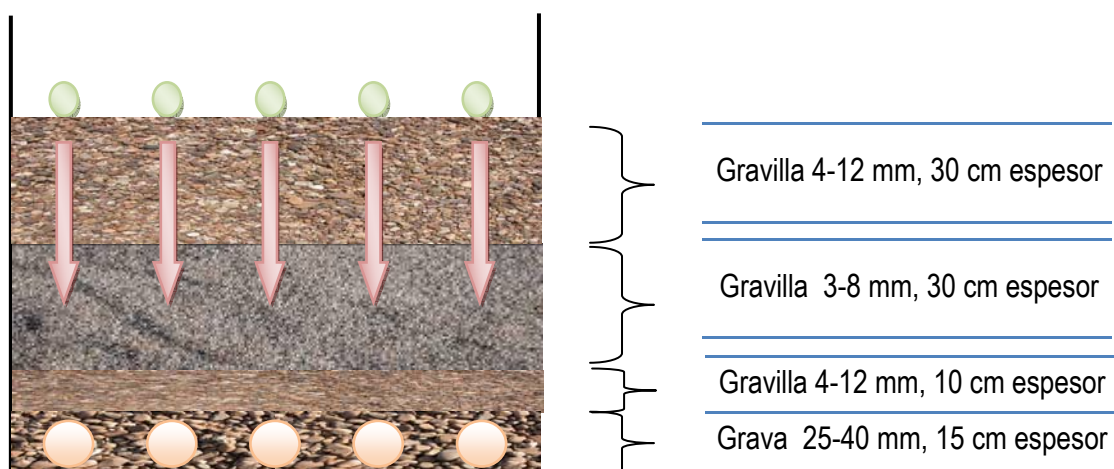


Ilustración 77. Características del sustrato del Humedal Artificial de Flujo Vertical HV3



Ilustración 78. Aspecto del Humedal Artificial de Flujo Vertical HV1



Ilustración 79. Aspecto del Humedal Artificial de Flujo Vertical HV3

4.4.2 Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal

Los tres Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal presentan sección rectangular, siendo sus dimensiones: 277 m² (24 x 11,5 m) para el Humedal HH2, 229 m² (26 x 8,8 m) en el caso del Humedal HH5, y 211 m² (26 x 8,1 m) para el Humedal HH6. El fondo de los tres Humedales presenta una pendiente, hacia la zona de evacuación, del 1%.

El volumen ocupado por los humedales se ha impermeabilizado con lámina plástica de PEAD de 2,5 mm de espesor, colocada sobre geotextil de 180 g/cm².

El espesor medio del sustrato filtrante es de 40 a 60 cm, variando su granulometría y naturaleza:

Tabla 18. Características de los Humedales Horizontales del estudio

HH2	grava sílicea	12 - 20 mm	60 cm
HH5	gravilla sílicea	4 – 12 mm	40 cm
HH6	gravilla caliza	3 - 8 mm	60 cm

(La lámina de agua está 5 cm por debajo de la superficie)

Inicialmente, tan sólo se plantó el humedal HH5, empleando para ello trozos de rizomas de carrizo (*Phragmites australis*), procedentes de un cauce cercano a la PECC. La densidad de plantación fue de 5 tallos/m². Posteriormente, se procedió a la plantación del humedal HH6, recurriendo también al empleo de carrizo y con la misma densidad de plantación que en el caso anterior. El Humedal HH2 se dejó sin plantar, al objeto de poder estudiar el efecto del sustrato filtrante en los mecanismos de depuración.

Para la alimentación y recogida de efluentes, en cabecera y en cola de estos Humedales (a modo de sistema de reparto y para la recogida de aguas depuradas, respectivamente), se han dispuesto sendas zonas de bolos de 40-80 mm. La alimentación se efectúa mediante tuberías de polietileno de 63 mm de diámetro, con perforaciones de 1 cm de diámetro. Estas tuberías descansan directamente en la parte superior de la zona de bolos dispuesta al comienzo de los Humedales.

La evacuación de los efluentes depurados se realiza a través de dos tuberías de drenaje de 125 mm de diámetro, embutidas en el fondo de la zona de bolos dispuesta a la salida. Los drenajes conectan con una tubería final flexible, ubicada en la arqueta de evacuación de efluentes. Esta tubería permite modificar el nivel de encharcamiento del sustrato.



Ilustración 80. Aspecto del Humedal Artificial de Flujo Horizontal HH2



Ilustración 81. Características del Humedal Artificial de Flujo Horizontal HH5



Ilustración 82. Características del Humedal Artificial de Flujo Horizontal HH6

Las elevadas concentraciones de las aguas residuales a tratar, habituales en las pequeñas poblaciones andaluzas, aconsejaron el empleo en la PECC de sustratos de una granulometría mayor de la que suele recomendarse para la construcción de Humedales Artificiales (Brix, 2004, Vymazal, 1998), al objeto de minimizar los riesgos de colmatación del sustrato. Además, en la etapa constructiva de todos los Humedales, se tuvo un especial cuidado en garantizar la homogeneidad granulométrica de todos los sustratos empleados.

Los Humedales HV1, HV3 y HH2 se alimentan con efluentes procedentes de un tanque Imhoff, construido en hormigón. El caudal de alimentación al tanque Imhoff se controla mediante caudalímetros electromagnéticos. Un sistema de electroválvulas y de sondas de nivel, dispuesto en la arqueta de salida del tanque Imhoff, permite alimentar los Humedales por bombeo de forma intermitente y modificar la cadencia y los volúmenes de cada dosificación.



Ilustración 83. Detalle del tanque Imhoff dispuesto en cabecera de los Humedales Artificiales



Ilustración 84. Detalle de la cámara de bombeo, sondas de nivel y electroválvulas

4.4.3 Humedal Artificial de Flujo Superficial

El Humedales de Flujo Superficial presenta sección rectangular, siendo sus dimensiones: 240 m² (24 x 10 m). El fondo presenta una pendiente, hacia la zona de evacuación, del 1%.

El volumen ocupado por los humedales se ha impermeabilizado con lámina plástica de PEAD de 2,5 mm de espesor, colocada sobre geotextil de 180 g/cm².

El espesor medio del sustrato filtrante es de 20 cm de gravilla de 4-12 mm, siendo la lámina de agua de 10 -50 cm. La vegetación utilizada para la plantación es: aneas, juncia, y juncos.



Ilustración 85. Vista parcial del Humedal Artificial de Flujo Superficial

Durante los años de investigaciones, los Humedales Artificiales implantados en la PECC han operado de acuerdo con los siguientes esquemas:

- ARU_{INFLUENTE} → Pret. → TI → HV1 → + HH5
- ARU_{INFLUENTE} → Pret. → TI → HH2 → HH6
- ARU_{INFLUENTE} → Pret. → TI → HV3 → H4

Donde:

ARU_{INFLUENTE}: agua residual influente

Pret.: Pretratamiento

TI: tanque Imhoff

HV1: Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical

HH2: Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal

HV3: Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical

H4: Humedal Artificial de Flujo Superficial

HH5: Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal

HH6: Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal

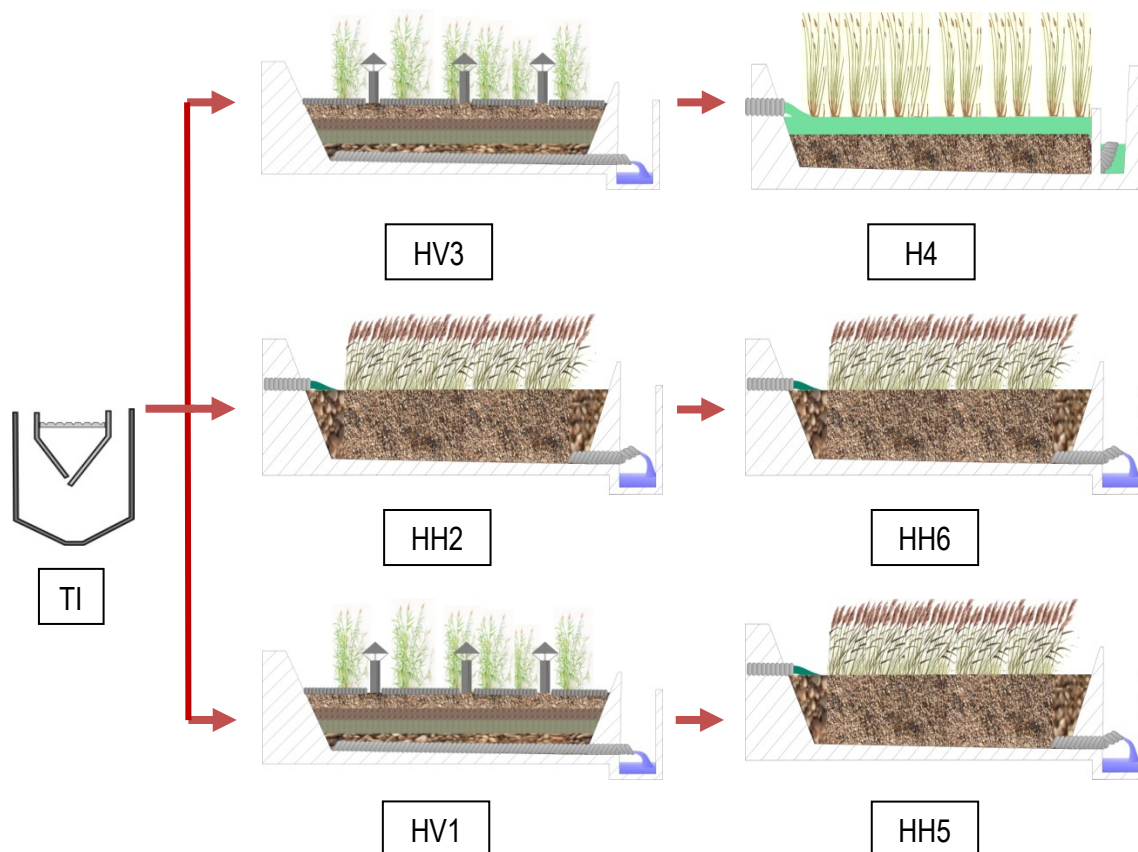


Ilustración 86. Diagrama de funcionamiento de los Humedales Artificiales en el transcurso de la investigación

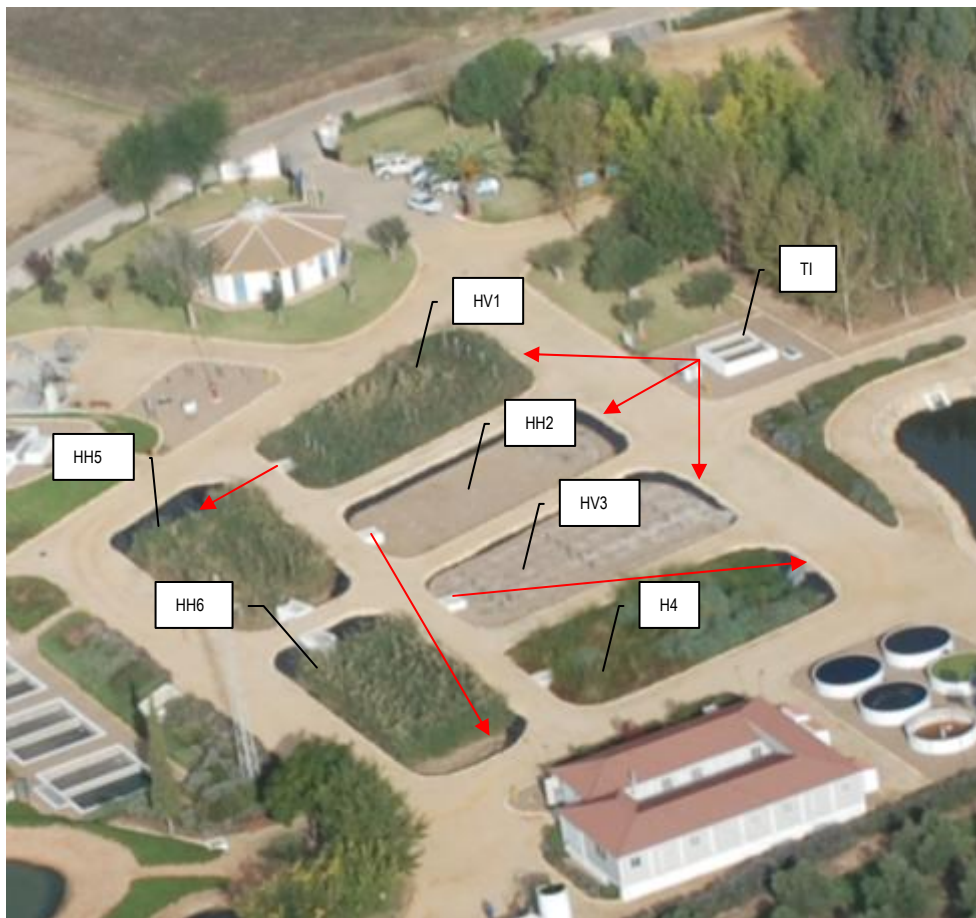


Ilustración 87. Imagen aérea de los Humedales Artificiales de la investigación

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este Capítulo se exponen los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, así como la discusión e interpretación de los mismos.

La investigación se ha desarrollado en los seis Humedales Artificiales presentes en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC), cuyas principales características se resumen en la Tabla 19. El período de estudio abarca tres años (desde junio de 2006 a julio de 2009). Los muestreos y análisis realizados se presentaron en el Capítulo III.

Para una más clara exposición de los resultados, se ha optado por dividirlos en cuatro bloques:

- En primer lugar se detallan los valores obtenidos en la caracterización del influente, se evalúa su biodegradabilidad y se representan frente a las variables climatológicas medidas *in situ* y que, sin duda, condicionan su funcionamiento y operatividad.
- A continuación se estudia el comportamiento del tratamiento primario (tanque Imhoff), describiendo sus condiciones operativas, analizando su rendimiento en la eliminación de materia orgánica, en suspensión y de nutrientes, y evaluando la influencia de las condiciones operativas (tiempo de retención hidráulica y velocidad ascensional) en estos rendimientos.
- En tercer lugar se analiza el comportamiento de los Humedales Artificiales sometidos a estudio, operando tanto de forma individualizada como en distintas combinaciones. Para cada humedal y combinación se analiza: sus condiciones operativas, los rendimientos de eliminación de materia orgánica, en suspensión y de nutrientes, y se evalúa el cumplimiento de la normativa de vertidos.
- En cuarto y último lugar se ha procedido a la comparación entre las distintas tipologías y posibles combinaciones de los humedales.

Tabla 19. Características constructivas de los Humedales estudiados

HA	Modalidad	Superficie (m ²)	Sustrato	Plantación	Alimentación
HV1	Flujo Subsuperficial Vertical	317	Arena 1-2 mm Grava 4-12 mm Grava 25-40 mm	Phragmites australis	tanque Imhoff
HH2	Flujo Subsuperficial Horizontal	277	Grava 12-20 mm	No	tanque Imhoff
HV3	Flujo Subsuperficial Vertical	288	Grava 4-12 mm Grava Caliza 3-8 mm Grava 4-12 mm Grava 25-40 mm	No	tanque Imhoff
H4	Flujo Superficial o de Flujo Libre	240	Columna de agua 10-50 cm Grava 4-12 mm	Typha, Scirpus, Juncus	HV3
HH5	Flujo Subsuperficial Horizontal	229	Grava 4-12 mm	Phragmites australis	HV1
HH6	Flujo Subsuperficial Horizontal	211	Grava Caliza 3-8 mm	Phragmites australis	HH2

1 CARACTERIZACIÓN DEL INFLUENTE

1.1 Composición

Se han estudiado los principales contaminantes presentes en las aguas residuales en todas las etapas de la investigación. Los parámetros analizados se han dividido en dos bloques, por un lado los parámetros relacionados con la presencia de materia orgánica y en suspensión (DQO, DBO₅ y SST) y por otro los relacionados con los nutrientes (Nt y Pt). Los resultados aparecen en la Tabla 20.

Tabla 20. Caracterización del influente

	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	Nt (mg/l)	Pt (mg/l)
VALOR MEDIO	383	738	268	65,8	11,3
DESV. ESTÁNDAR	120	239	109	16,0	3,4
VALOR MÁXIMO	700	1212	860	136,6	23,0
VALOR MÍNIMO	110	266	96	33,6	4,0
Nº DE VALORES	127	127	127	98	109

Si comparamos estos valores con los obtenidos para distintos tamaños de población y recogidos en la Tabla 21 y Tabla 22 (Salas, 2007), cabe concluir que las aguas residuales empleadas en nuestra investigación se corresponden con los valores típicos de población pequeña. Recordar que Carrión de los Céspedes (población cuya agua residual es tratada en la PECC) tiene tan sólo una población de 2.400 habitantes.

Señalar que los valores más altos se corresponden con muestras tomadas en los meses de septiembre y octubre, por lo que cabe pensar que pueden corresponderse con episodios de vertidos procedentes de la industria del aderezo, ya que es en estos meses precisamente cuando se genera este tipo de vertidos. Los valores mínimos se corresponden con fechas de intensas lluvias, concretamente el valor más bajo en cuanto a concentración de DBO₅ se da en abril de 2008, mes que presentó una precipitación mensual de 175 mm.

Tabla 21. Valores típicos de las ARU para medianas y grandes poblaciones (Salas, 2007)

Parámetro	Rango habitual
Sólidos en Suspensión Totales (mg/l)	100 – 250
DBO ₅ (mg/l)	150 – 350
DQO (mg/l)	300 – 700
Nt (mg N/l)	50 – 75
Pt (mg P/l)	15 – 20

Tabla 22. Valores típicos de las ARU para pequeñas poblaciones (Salas, 2007)

Parámetro	Rango habitual
Sólidos en Suspensión Totales (mg/l)	250 – 400
DBO ₅ (mg/l)	350 – 700
DQO (mg/l)	700 – 1.400
Nt (mg N/l)	50 – 100
Pt (mg P/l)	10 – 20

1.2 Biodegradabilidad

De acuerdo con la Tabla 23, en la que se representa la relación entre la DBO₅ y la DQO de las aguas a tratar, y a las relaciones enunciadas en la bibliografía (Hernández, 1995), se puede catalogarse nuestra agua residual de entrada como muy biodegradable, y por tanto, susceptible de ser depurada por tratamientos biológicos (como pueden ser los Humedales Artificiales).

Tabla 23. Caracterización del influente en base a su biodegradabilidad

	DBO ₅ /DQO
VALOR MEDIO	0,53
DESV. STANDAR	0,10
VALOR MÁXIMO	0,82
VALOR MÍNIMO	0,29
Nº DE VALORES	127

1.3 Influencia de la pluviometría en la composición

En la Figura 11 y la Figura 12 se representa la evolución de la composición (DBO₅ y SST) del agua residual influente, a lo largo de toda la investigación, frente a los valores de pluviometría registrados.

Como se observa en ambas figuras, y como era de esperar dado que el saneamiento de Carrión de los Céspedes es de tipo unitario, los valores más bajos en las concentraciones de materia orgánica y en suspensión se corresponden con los períodos de precipitación más intensa (otoño de 2006 y primavera de 2008).

Aunque los datos se detallan en el Anexo I, comentar que la media mensual de la precipitación durante el período de estudio ha sido de 46,6 mm. La suma total de precipitación ha sido de 806,3 mm en 2006; 383,5 mm en 2007; 583,3 mm en 2008 y 230,6 mm de enero a julio de 2009.

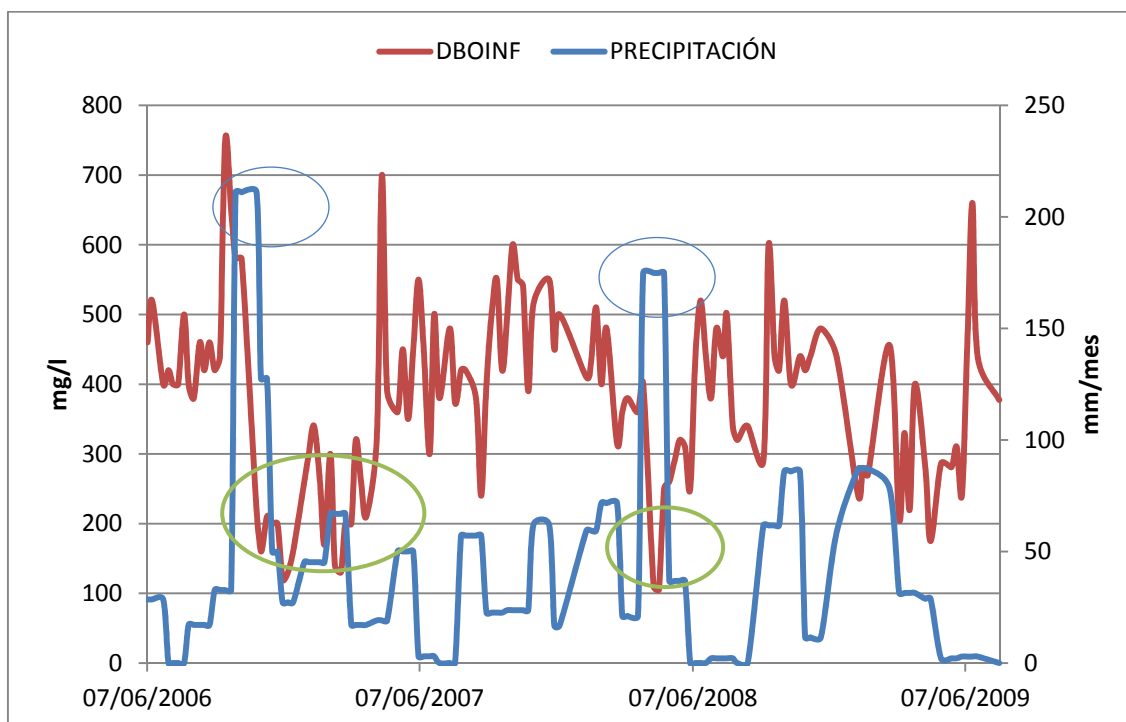


Figura 11. Evolución de la concentración de DBO₅ en el influente frente a la pluviometría

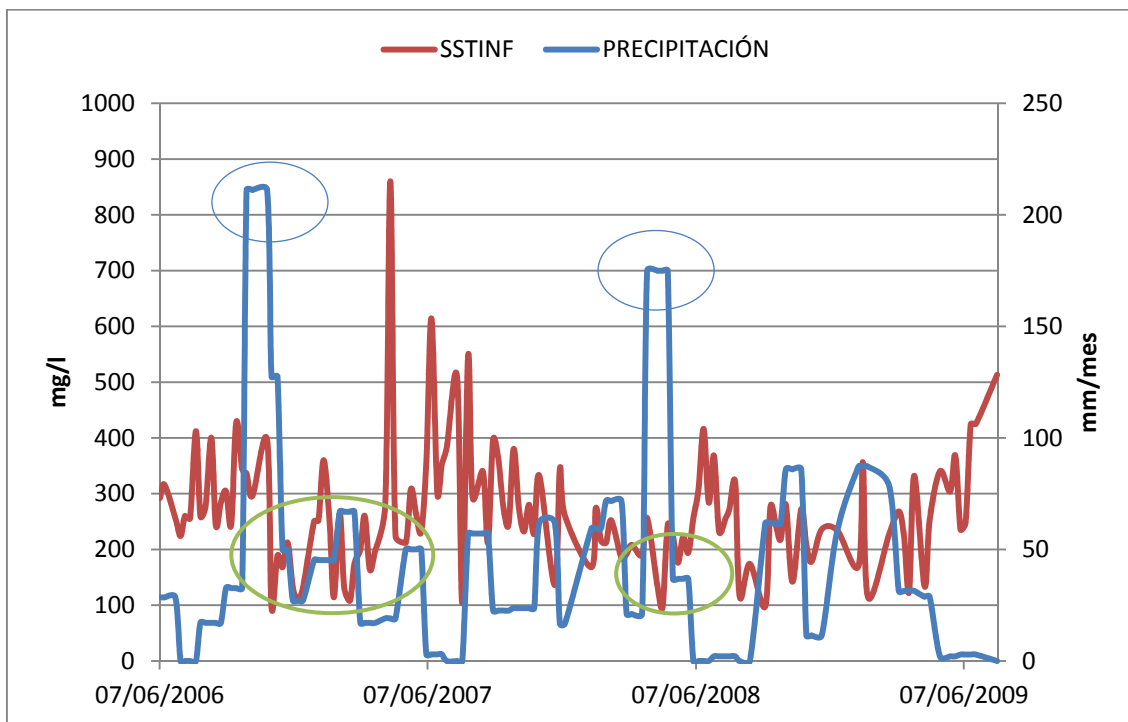


Figura 12. Evolución de la concentración de SST en el influente frente a la pluviometría

El efecto de la precipitación es extrapolable al resto de los parámetros que caracterizan al agua residual influente.

El agua influente utilizada en nuestra investigación, por tanto, es una típicamente de poblaciones pequeñas y cuya concentración varía en función de la precipitación acaecida.

2 COMPORTAMIENTO DEL TRATAMIENTO PRIMARIO

Tal y como se describe en el Capítulo III, el esquema de funcionamiento a lo largo de la experimentación ha sido el siguiente: el agua residual proveniente del municipio sevillano de Carrión de los Céspedes es conducida a la Planta Experimental a través de dos colectores que se unen justo antes de ingresar en las instalaciones. Dicha agua residual es sometida a un Pretratamiento (descrito en el Capítulo III) y de aquí es bombeada a un sistema de distribución desde donde es repartida a los distintos sistemas experimentales. La fracción de agua residual objeto de este estudio es la que es conducida hacia el tanque Imhoff desde donde se alimenta a los sistemas de Humedales Artificiales.

2.1 Condiciones operativas

Las condiciones medias bajo las que ha operado el tanque Imhoff a lo largo de la investigación se exponen en la tabla siguiente.

Tabla 24. Condiciones operativas del tanque Imhoff

	Caudal AR (m ³ /d)	Tiempo de retención hidráulica (h)	Velocidad ascensional (m/h)
VALOR MEDIO	37,4	3,9	0,16
DESVIACIÓN STANDAR	5,5	0,6	0,02
VALOR MÁXIMO	54,6	5,7	0,24
VALOR MÍNIMO	25,3	2,6	0,11
Nº DE VALORES	127	127	125
Valores bibliográficos	-	1,5	1,0 – 1,5

Se observa que el tanque Imhoff ha operado con valores de tiempo de retención hidráulica y velocidad ascensional que se encuentran fuera de los habituales, como consecuencia de que durante la investigación el sistema se ha alimentado con caudales inferiores a los de diseño.

2.2 Rendimientos de eliminación

La Tabla 25 y Tabla 26 recogen, respectivamente, las características del efluente del tanque Imhoff y los porcentajes medio de reducción de los parámetros analizados en relación al agua residual de entrada.

Tabla 25. Características del efluente del tanque Imhoff

	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	Nt (mg/l)	Pt (mg/l)
VALOR MEDIO	243	467	118	57,0	9,0
DESV. STANDAR	99	161	36	19,0	3,3
VALOR MÁXIMO	460	1043	244	88,0	14,7
VALOR MÍNIMO	40	94	21	2,4	2,5
Nº DE VALORES	127	127	127	59	66

Tabla 26. Rendimiento de eliminación de contaminantes en el tanque Imhoff

	% red. DBO ₅	% red. DQO	% red. SST	% red. Nt	% red. Pt
VALOR MEDIO	36	35	51	6	17
DESV. STANDAR	17	14	18	18	21
VALOR MÁXIMO	77	66	85	62	72
VALOR MÍNIMO	-10	-21	-12	-51	-17
Nº DE VALORES	127	127	127	56	62
Valores bibliográficos	30 - 40	30 - 40	50 - 60	5 - 10	5 - 15

Tal como se observa en la tabla anterior los valores obtenidos se encuentran dentro de los límites típicos citados en la bibliografía para esta modalidad de tratamiento (Vymazal, 2008).

2.3 Influencia de las condiciones operativas

Para poder evaluar la respuesta del tanque Imhoff frente a las distintas situaciones de operación, se ha analizado la eliminación de las cargas de sólidos y orgánica frente a las dos variables que

más le influyen: el tiempo de retención hidráulico y la velocidad ascensional (ambos calculados para la zona de decantación del tanque Imhoff).

En las siguientes figuras se representan la evolución de las cargas de sólidos en suspensión totales y orgánica eliminadas en el tanque Imhoff, frente al tiempo de retención hidráulica y la velocidad ascensional para los diferentes días muestreados en el período ensayado.

Para las figuras que se muestran a continuación, se han representado (ordenados de menor a mayor) el valor de tiempo de retención hidráulico (Figura 13 y Figura 15) y velocidad ascensional (Figura 14 y Figura 16) frente a la concentración de carga eliminada (de sólidos y orgánica) respectivamente.

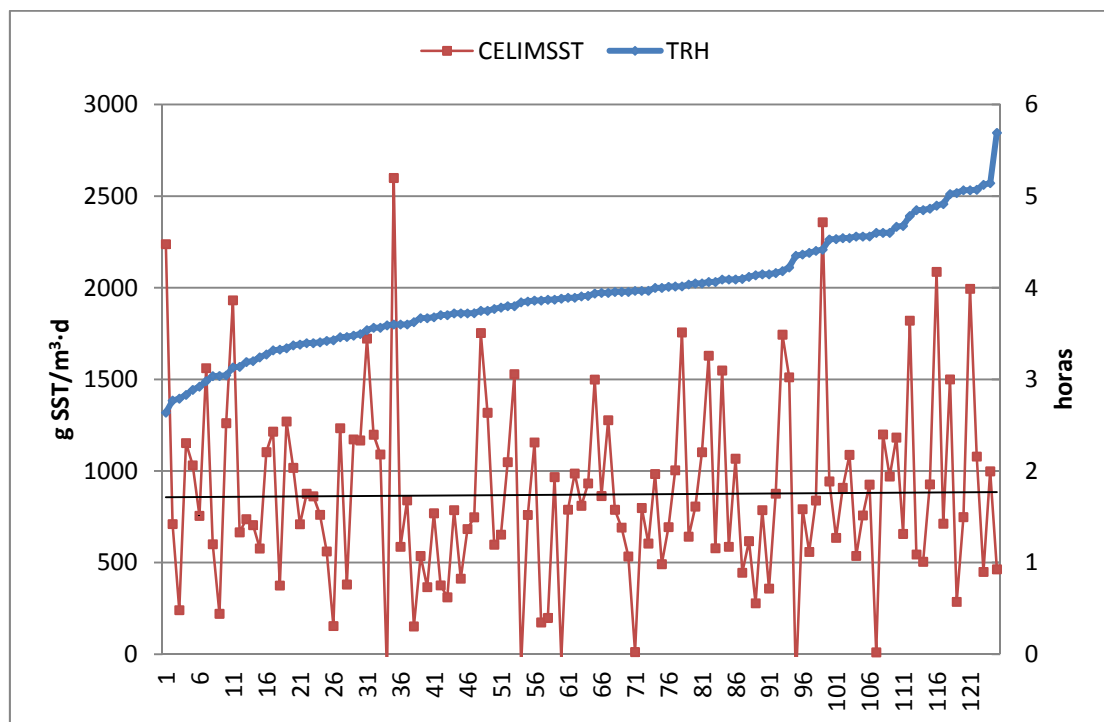


Figura 13. Carga eliminada de sólidos en el tanque Imhoff frente a tiempo de retención hidráulica

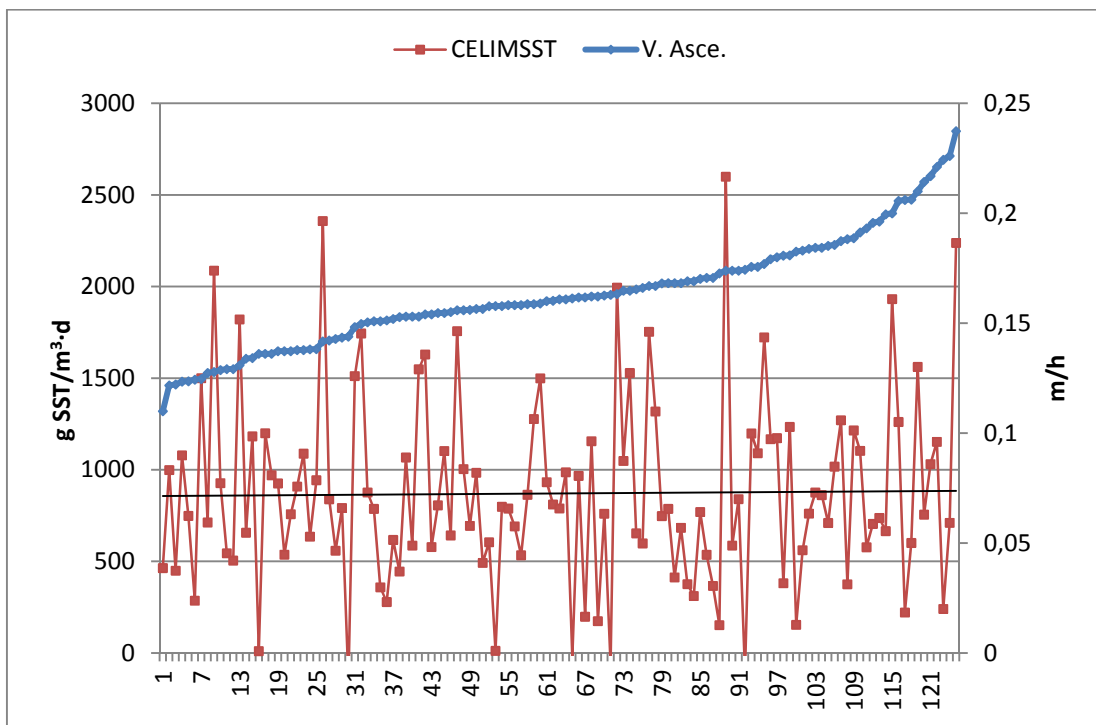


Figura 14. Carga de sólidos eliminada en el tanque Imhoff frente a velocidad ascensional

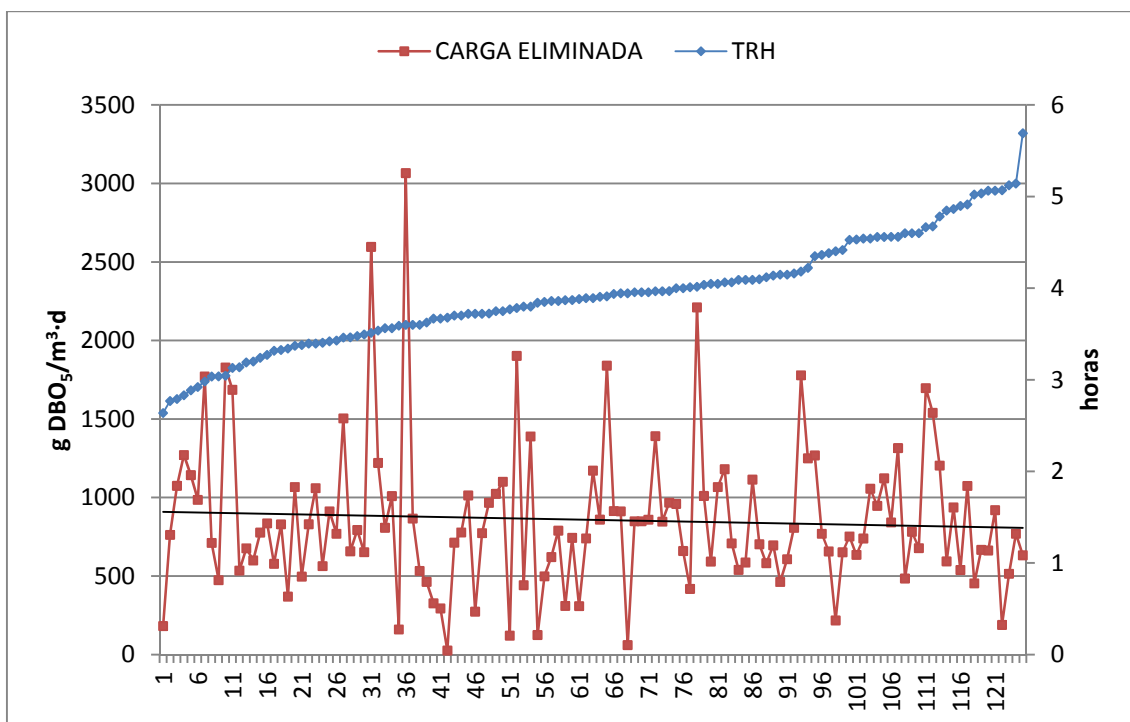


Figura 15. Carga orgánica eliminada en el tanque Imhoff frente a tiempo de retención hidráulica

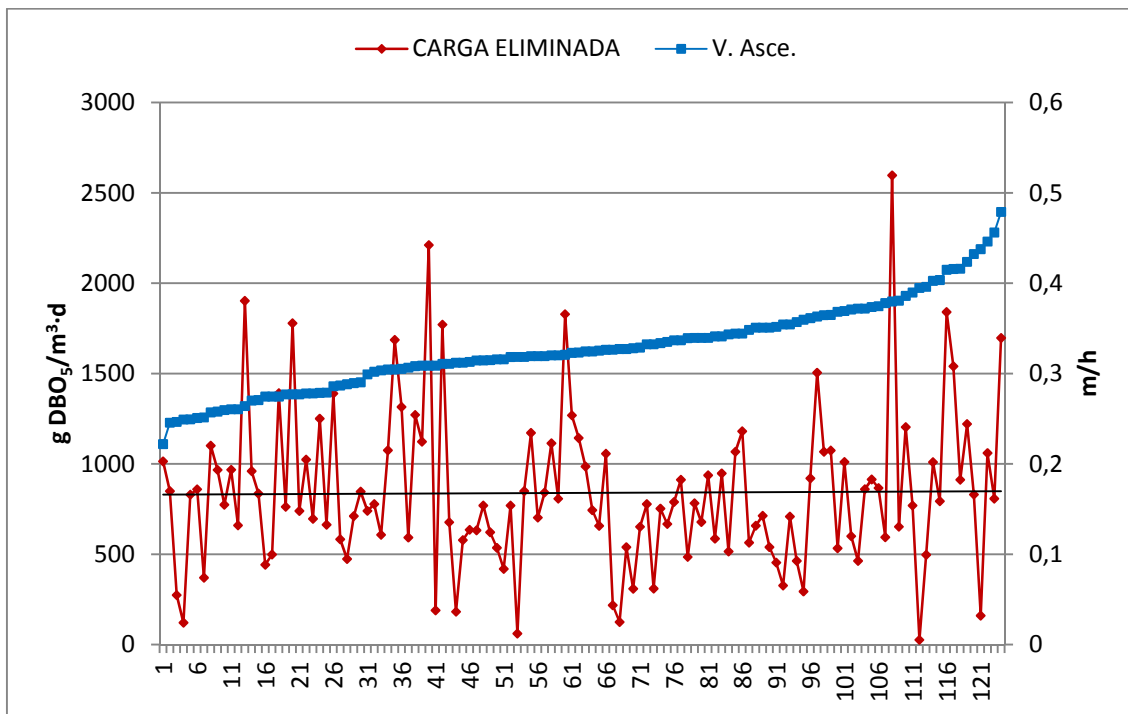


Figura 16. Carga orgánica eliminada en el tanque Imhoff frente a velocidad ascensional

De la observación de estas cuatro figuras se deduce que para los valores de tiempo de retención hidráulica y velocidad ascensional, con los que se ha operado el tanque Imhoff a lo largo de la investigación, su influencia sobre las cargas volumétricas (de sólidos y orgánica) eliminadas ha sido poco significativa. Este hecho puede explicarse a que se ha trabajado con caudales inferiores a los de diseño del tanque Imhoff.

Para finalizar se ha representado la evolución de las concentraciones de DBO_5 y SST en el influente y efluente del tanque Imhoff a lo largo de todo el periodo de estudio (Figura 17 y Figura 18). La similitud en la evolución de ambas concentraciones, es, en general, un fiel reflejo de la escasa capacidad de amortiguación de este tipo de sistema.

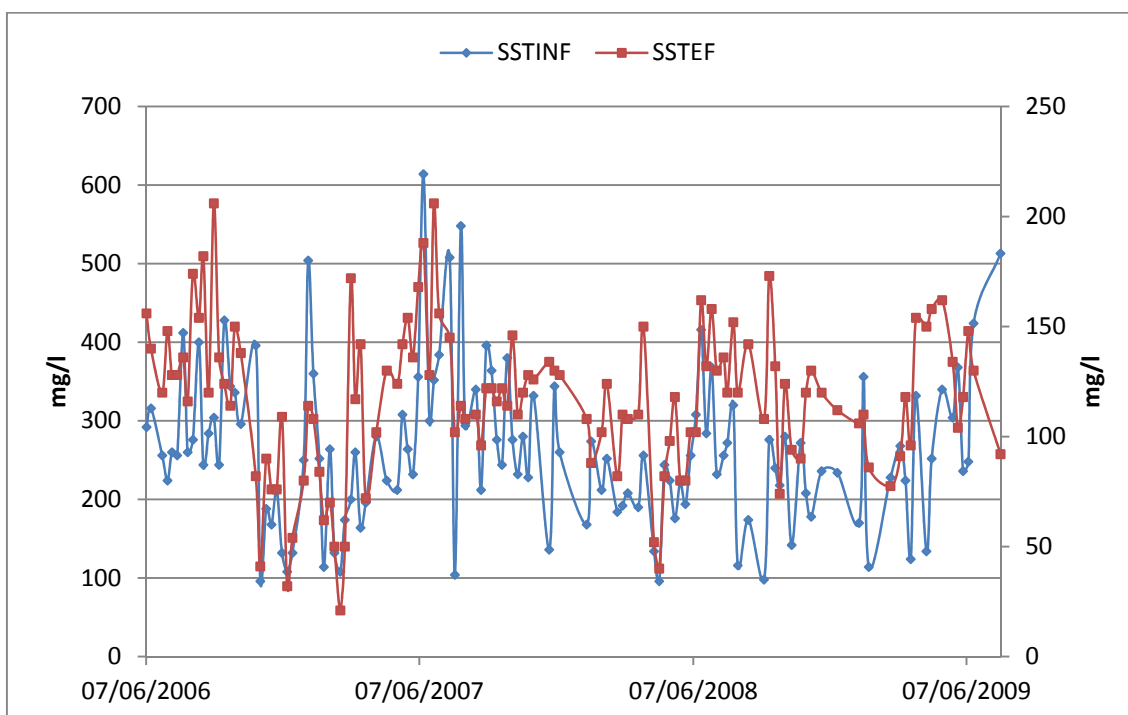


Figura 17. Evolución de la concentración de SST en el influente y effluente del tanque Imhoff

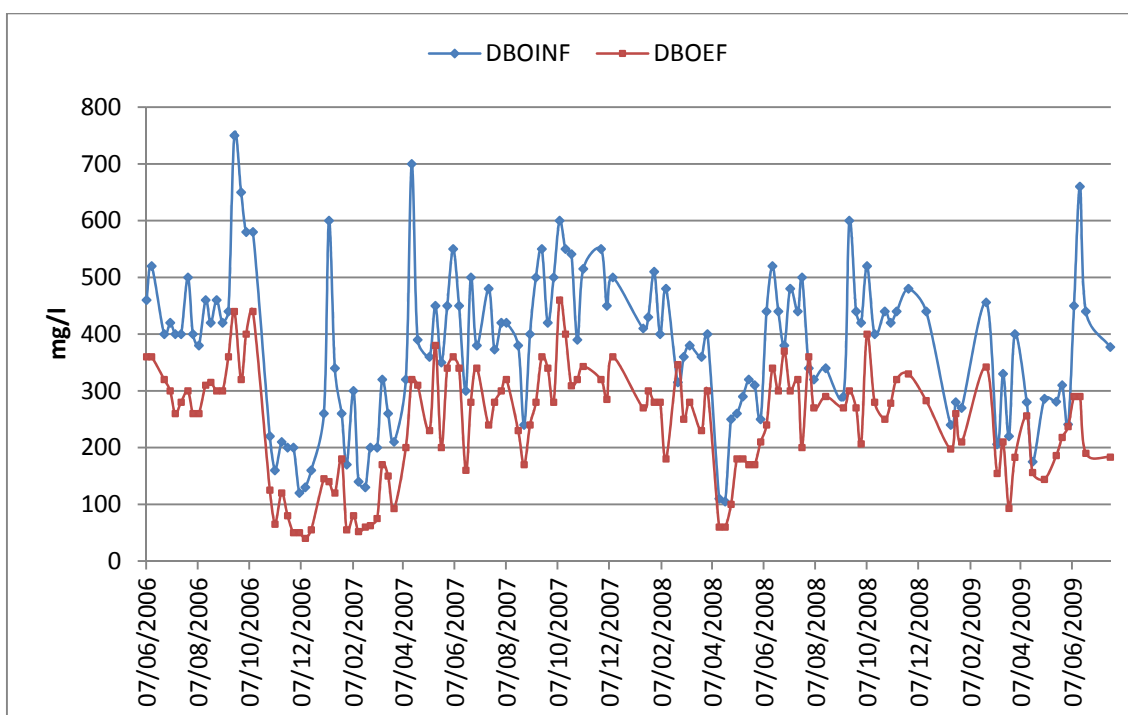


Figura 18. Evolución de la concentración de DBO₅ en el influente y effluente del tanque Imhoff

3 COMPORTAMIENTO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

En el bloque que viene a continuación se exponen los resultados obtenidos en la salida de cada uno de los 6 Humedales Artificiales estudiados. Tal como se comentó anteriormente, sobre estos valores obtenidos se han determinado tanto la media de todo el periodo de investigación como las medias parciales para las distintas configuraciones de operación. Igualmente se ha representado la evolución de los parámetros estudiados a lo largo de toda la experimentación.

3.1 Humedales de Flujo Subsuperficial Vertical

3.1.1 Humedal Vertical HV1

3.1.1.1 Condiciones operativas

El HV1 se alimenta con agua residual procedente del tanque Imhoff. Los parámetros operacionales medios de toda la investigación se muestran en la Tabla 27 y Tabla 28.

Como se aprecia en las tablas, se ha operado con valores muy cercanos a los habituales (Vymazal, 2008).

Tabla 27. Valores operacionales del HV1

	Carga orgánica superficial (g DBO ₅ /m ² *d)	Carga de sólidos superficial (g SST/m ² *d)	Carga de nitrógeno superficial (g Nt/m ² *d)	Carga de fósforo superficial (g Pt/m ² *d)
VALOR MEDIO	10,7	5,2	2,5	0,4
DESV. STANDAR	4,4	1,6	0,9	0,1
VALOR MÁXIMO	22,2	11,6	5,4	0,7
VALOR MÍNIMO	2,0	1,3	0,1	0,1
Nº DE VALORES	127	127	57	64
Valores bibliográficos	10,6	6,8	3,9	0,5

Tabla 28. Valores operacionales del HV1 (continuación)

	Caudal (m ³ /d)	Carga hidráulica (m ³ /m ² *d)
VALOR MEDIO	14,3	0,045
DESV. STANDAR	2,4	0,007
VALOR MÁXIMO	21,4	0,067
VALOR MÍNIMO	9,5	0,030
Nº DE VALORES	127	127

3.1.1.2 Rendimientos de eliminación

En la Tabla 29 y Tabla 30 se muestran los rendimientos de depuración del HV1 en cuanto a eliminación de DQO, DBO₅, SST, Nt y Pt. Para los cálculos de rendimiento, se han tomado como valores de entrada los correspondientes a la salida del tanque Imhoff, vistos en el apartado anterior.

Tabla 29. Valores del efluente y rendimiento del HV1

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	100	78	28	88	25	79
DESV. TÍPICA	44	8	18	7	17	15
VALOR MÁXIMO	244	94	95	98	85	100
VALOR MÍNIMO	30	48	< 13	47	< 10	10
Nº DE VALORES	117	117	117	117	117	117

Tabla 30. Valores del efluente y rendimiento del HV1 (continuación)

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	23,6	57	8,3	6
DESV. TÍPICA	9,4	19	3,3	24
VALOR MÁXIMO	58,2	88	15,6	70
VALOR MÍNIMO	4,0	-19	2,0	-88
Nº DE VALORES	63	56	66	57

Los rendimientos medios que aparecen en las tablas anteriores se han calculado como media aritmética del conjunto de valores obtenidos en las determinaciones analíticas realizadas sobre el influente y efluente del humedal en estudio.

En la Figura 19 se representan los valores de DBO_5 en la salida del HV1 frente a los de entrada. Se observa una nube de puntos cuyo comportamiento es difícil de explicar. Aunque ésta ha sido la forma tradicional de representar el comportamiento de estos sistemas, en la actualidad, y en las publicaciones más recientes, se opta por representar y realizar un análisis de cargas (Kadlec, 2009). De esta manera se integra en un único valor distintos factores de influencia tales como superficie del humedal, caudal circulante, etc., y permite una mejor comparativa entre distintos sistemas.

Mientras que en la Figura 19 lo que se observa es una nube de puntos con más o menos tendencia, en la Figura 20 podemos obtener una ecuación cuya pendiente es el porcentaje de reducción de la carga aplicada. Para el caso del HV1 dicha pendiente, y por tanto el porcentaje de reducción obtenido en cuanto a eliminación de materia orgánica, es del 89%.

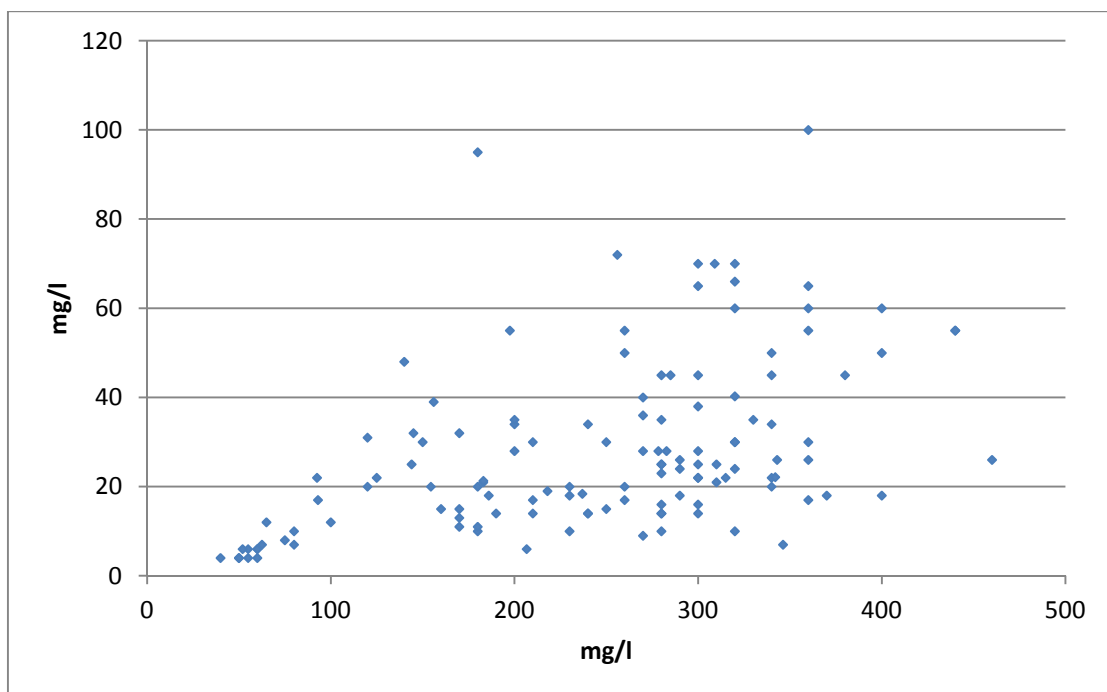


Figura 19. Valores de concentración de DBO_5 de salida del HV1 frente a los de entrada

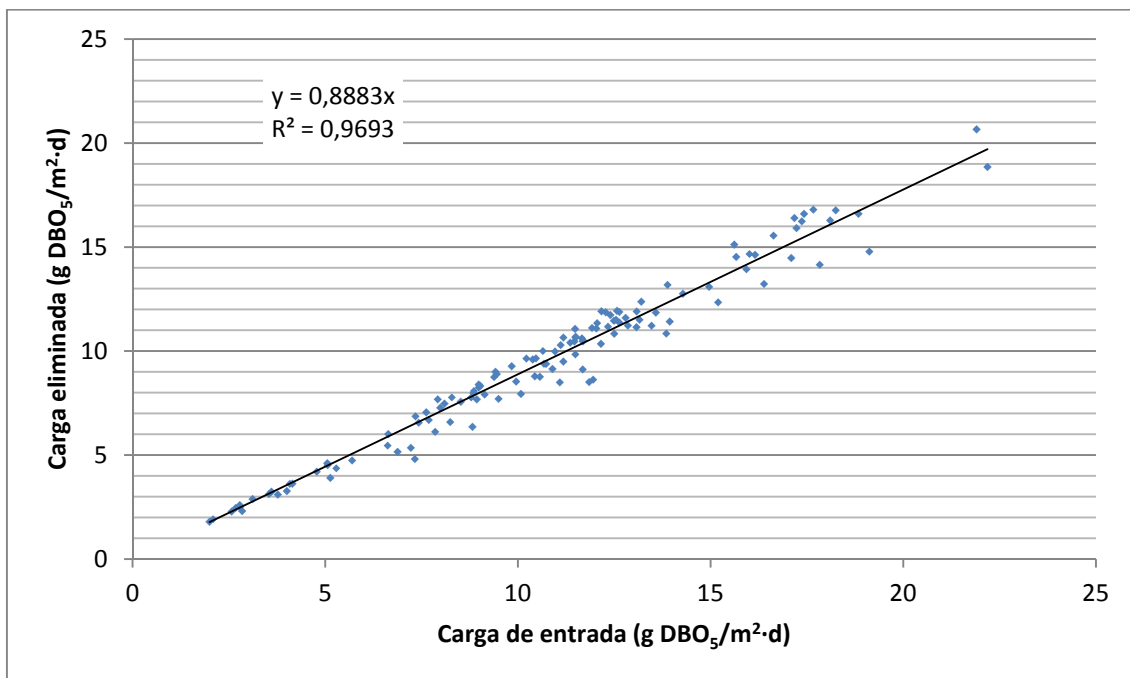


Figura 20. Carga orgánica eliminada frente a carga de entrada en el HV1

Si se representa conjuntamente los valores de la DBO_5 de entrada y los valores de la DBO_5 de salida (Figura 21) se observa la gran robustez e inercia en este Humedal Artificial.

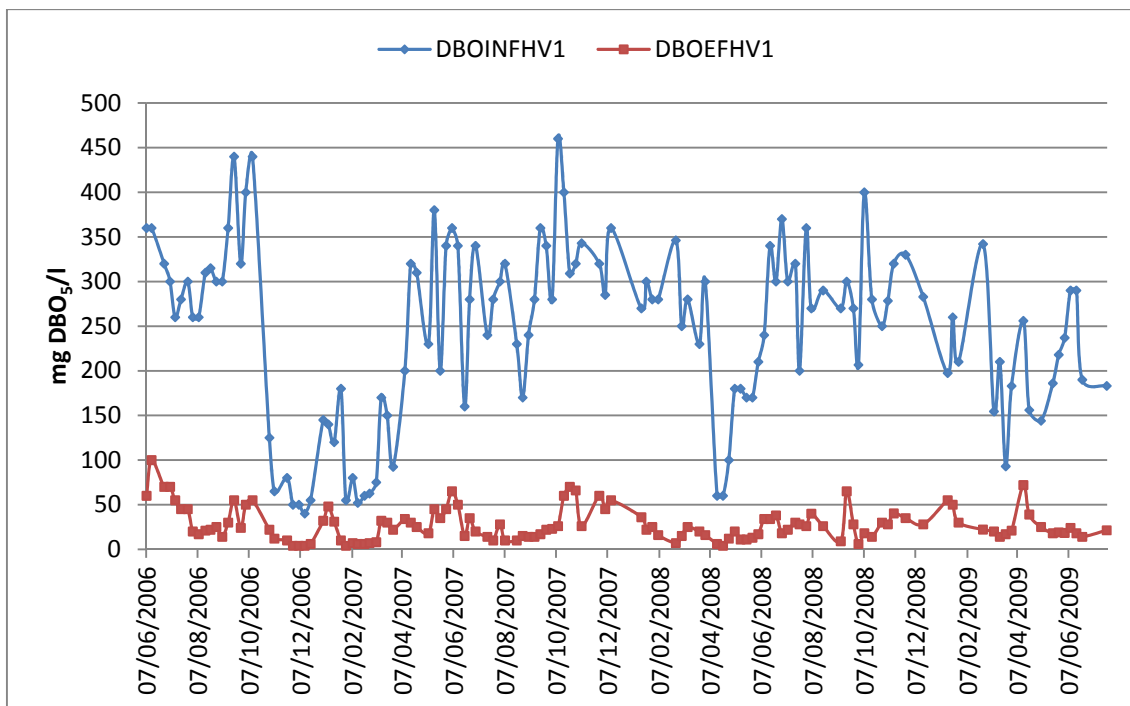


Figura 21. Concentración de DBO_5 a la entrada y salida del HV1

Del mismo modo que se ha calculado el porcentaje de carga orgánica eliminada se ha realizado para la carga de sólidos y la de nitrógeno. La recta del fósforo tiene un factor muy bajo de correlación por lo que se ha optado por no representarla.

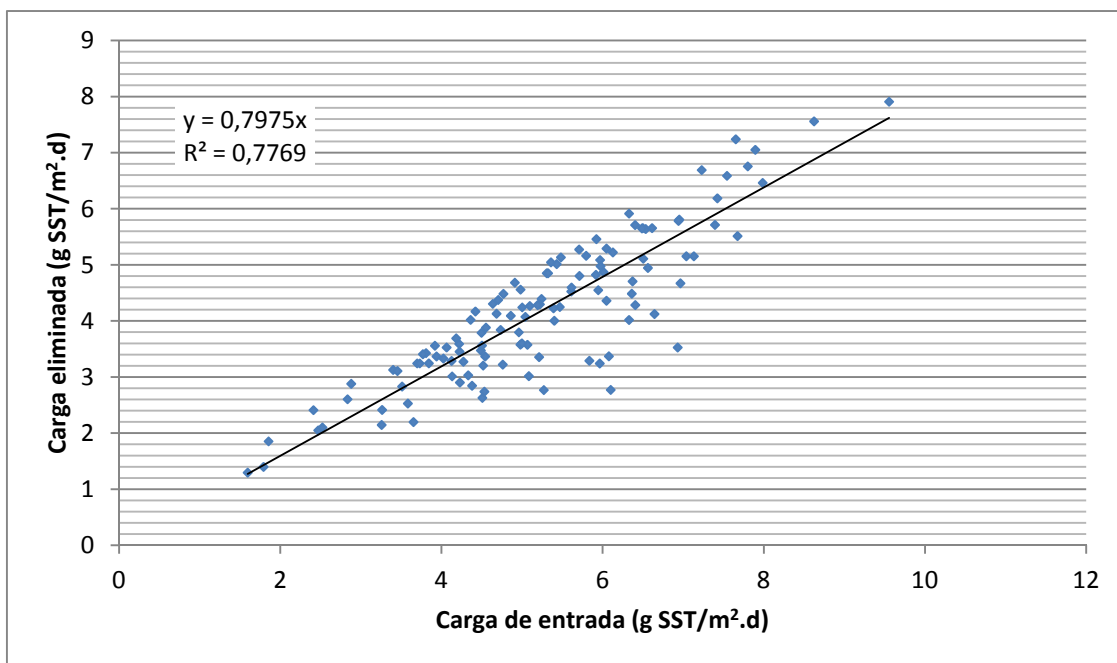


Figura 22. Carga eliminada de SST frente a carga de entrada en el HV1

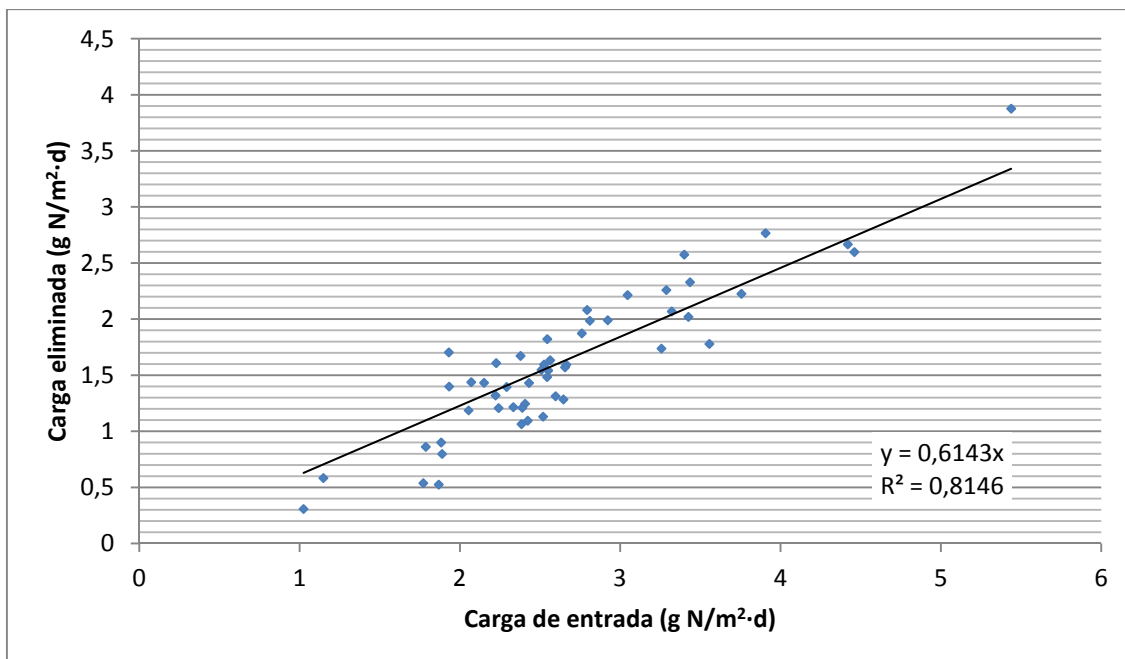


Figura 23. Carga eliminada de Nt frente a carga de entrada en el HV1

Respecto a la eliminación de sólidos, la Figura 22 representa la carga de entrada frente a la eliminada, obteniéndose un valor de reducción de sólidos de un 80%. En la Figura 23 se representa lo mismo respecto al nitrógeno total, obteniéndose un valor de reducción de un 61%.

3.1.1.3 Rendimientos de depuración globales

Para evaluar los rendimientos globales de depuración (que suelen ser los que aparecen en la bibliografía) se han calculado los porcentajes de reducción tomando como valores del influente los de entrada al tanque Imhoff y los del efluente, los de salida del Humedal Artificial, (Tabla 31 y Tabla 32).

Tabla 31. Valores globales obtenidos en el HV1

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	100	86	28	93	25	90
DESV. TÍPICA	47	7	19	5	18	7
VALOR MÁXIMO	255	97	100	99	92	100
VALOR MÍNIMO	14	44	4	74	0	67
Nº DE VALORES	127	127	127	127	127	127
Valores bibliográficos	-	80-90	-	90-95	-	90-95

Tabla 32. Valores globales obtenidos en el HV1 (continuación)

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	23,6	61	8,3	25
DESV. TÍPICA	9,4	16	3,3	23
VALOR MÁXIMO	58,2	95	15,6	79
VALOR MÍNIMO	4,0	-4	2,0	-23
Nº DE VALORES	63	59	66	64
Valores bibliográficos	-	60-70	-	20-30

Los porcentajes de reducción obtenidos en este sistema están en concordancia con los citados en la bibliografía (Salas, 2007).

3.1.1.4 Cumplimiento de la normativa de vertidos

En cuestión de tratamiento de aguas residuales la legislación vigente es la que emana de la transposición de la Directiva 91/271/CEE.

Por lo que respecta a los valores absolutos de concentración, esta Directiva se cumple en lo referente a la DQO (100 mg/l) y SST (25 mg/l), y se está al límite en lo referente a la DBO₅ (28 mg/l). Esto es normal en sistemas instalados en pequeñas aglomeraciones (influentes más concentrados), en los que el cumplimiento del porcentaje de reducción es fácilmente alcanzable, no siendo así en el caso de las concentraciones.

Tabla 33. Comparativa con los parámetros de vertido en el HV1

Parámetros	Valores legales		Valores obtenidos	
	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción	Concentración	Porcentaje medio de reducción
DBO ₅	25 mg/l	70-90 %	28 mg/l	93 %
DQO	125 mg/l	75 %	100 mg/l	86 %
SST	35 mg/l	90 %	25 mg/l	90 %

En cuanto a los parámetros de vertido referentes a eliminación de nutrientes, ni en caso del nitrógeno ni en el fósforo se estaría de acuerdo a la legislación vigente para vertidos procedentes de aglomeraciones mayores de 2.000 h.e. y que se efectúen en zonas sensibles.

Tabla 34. Comparativa con los parámetros de vertido en el HV1

Parámetros	Valores legales		Valores obtenidos	
	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción	Concentración	Porcentaje medio de reducción
Nt	10-15 mg/l	70-80 %	24 mg/l	61 %
Pt	1-2 mg/l	80 %	8 mg/l	25 %

En resumen, se puede decir que el HV1 ha depurado conforme a lo exigido en porcentajes mínimos de reducción para zonas calificadas como *normales*. No sería un sistema apropiado

para depurar las aguas de aglomeraciones superiores a 2.000 h.e. que vertieran en una zona catalogada como *sensible*.

Aunque la tabla anterior nos da una buena idea del cumplimiento del sistema frente a la normativa, no menos importante es saber que porcentajes de veces el efluente está en parámetro de vertido. En las figuras que se muestran a continuación se representan los distintos valores (para DBO₅, DQO, SST y Nt) que se encuentran por debajo y por encima de los límites permitidos.

En la Tabla 35 se resumen los porcentajes de valores que en la investigación ha estado por debajo de los límites legales de vertido.

Tabla 35. Porcentajes de valores dentro de los límites de vertido en el estudio del HV1

	DBO ₅	DQO	SST	Nt
Porcentaje (%)	57	79	75	13

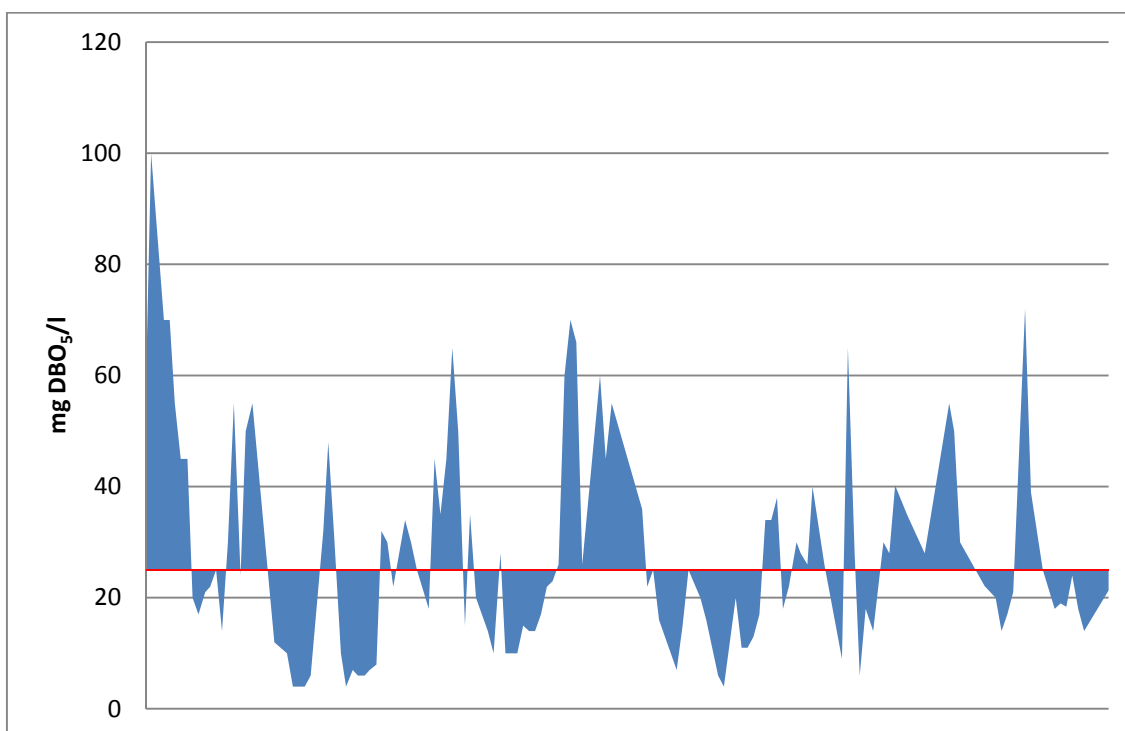


Figura 24. Valores de concentración de DBO₅ a lo largo del estudio en la salida del HV1

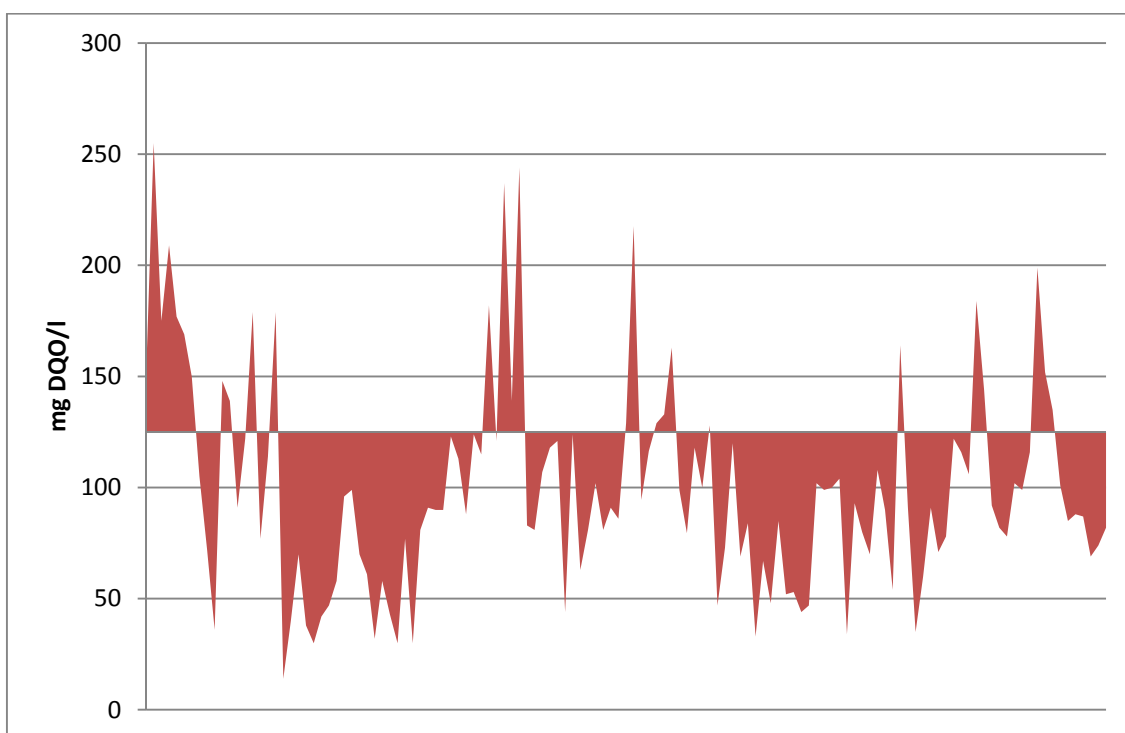


Figura 25. Valores de concentración de DQO a lo largo del estudio en la salida del HV1

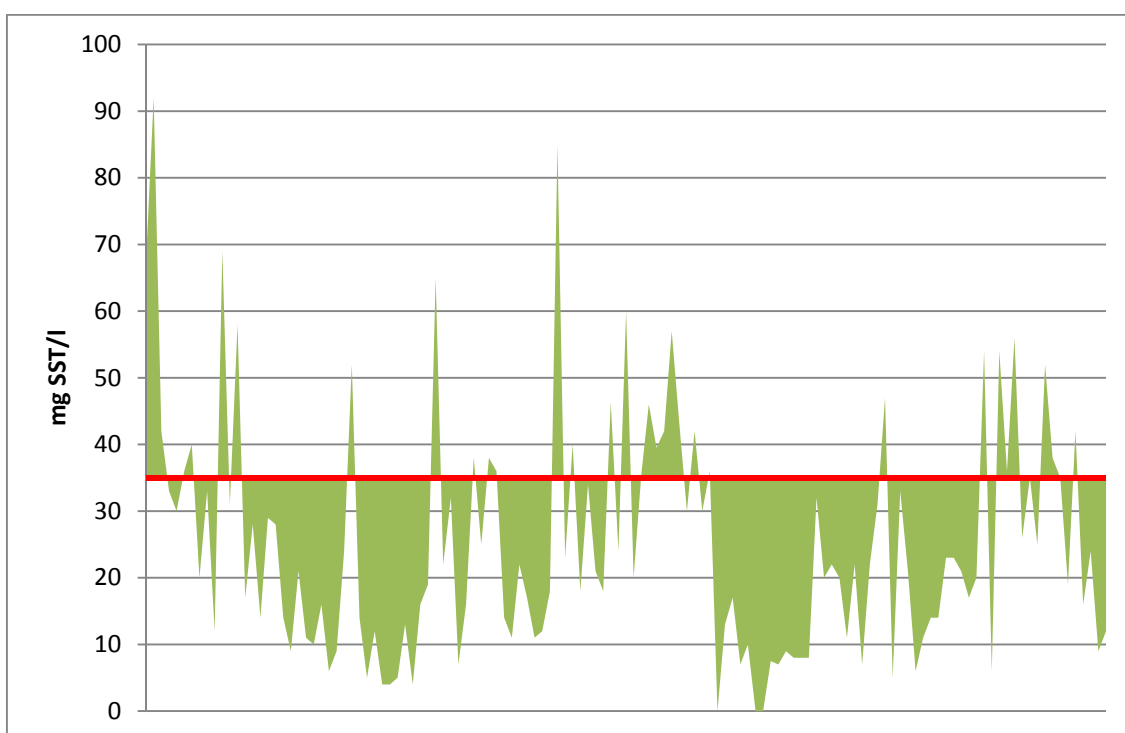


Figura 26. Valores de concentración de SST a lo largo del estudio en la salida del HV1

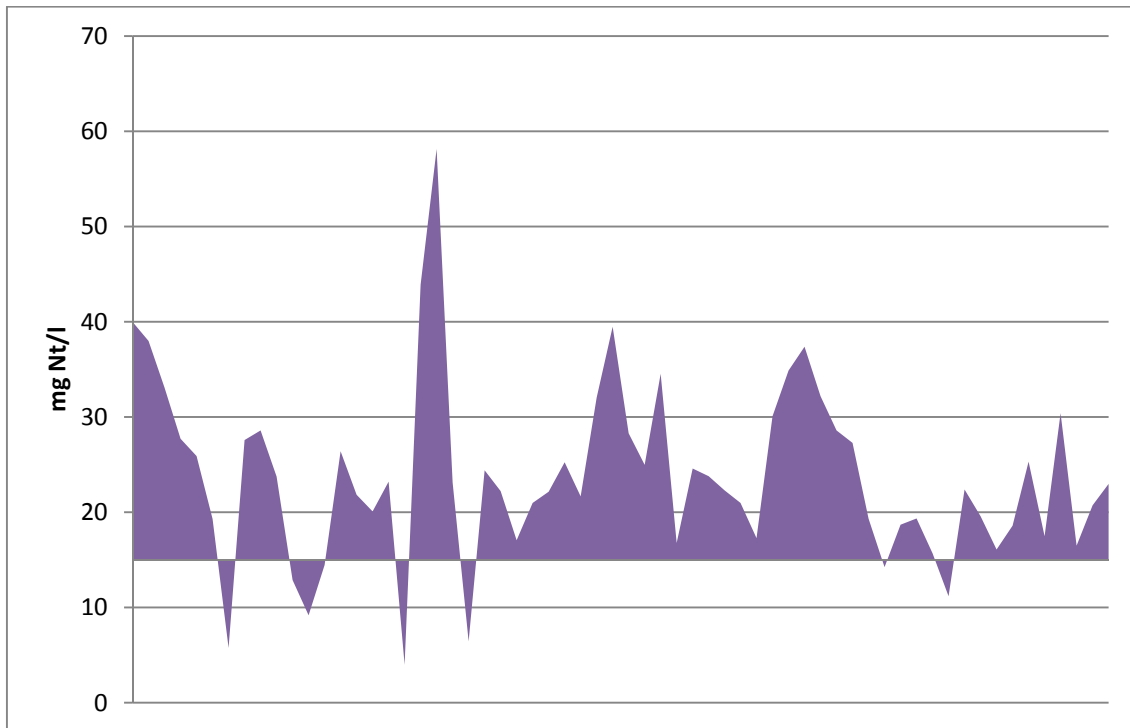


Figura 27. Valores de concentración de Nt a lo largo del estudio en la salida del HV1

3.1.1.5 Cálculo de la constante K_A

Como se ha comentado en apartados anteriores, para el cálculo de la superficie necesaria de un humedal se utiliza habitualmente la expresión:

Ecuación 18. Ecuación para el cálculo de la superficie de un humedal (Kadlec, 1996)

$$\text{Área} = Q \times \frac{\ln[C_i/C_o]}{K_A}$$

Donde

Q = caudal (m^3/d)

C_i = Concentración de entrada ($\text{mg DBO}_5/\text{l}$)

C_o = Concentración de salida ($\text{mg DBO}_5/\text{l}$)

K_A = constante (m/d)

El valor de esta K_A habitualmente se refiere a la DBO_5 por lo que se le denomina K_{DBO_5} . El valor de esta constante ha sido citado por diversos autores: Kickuth (1977, 1981) lo establece en

69,35 m/año, Schierup (1990) en 30,30 m/año, Vymazal (2008) en 31,76 m/año o Kadlec (2009) de 20 a 60 m/año. Este valor es variable en función de la carga hidráulica, carga orgánica superficial y años de operación del sistema (Brix, 1998).

A partir de los valores obtenidos en la investigación se ha calculado la K_A para cada uno de los humedales en estudio. En la Figura 28 se representan los valores obtenidos para distintos rangos de carga orgánica en el HV1, presentando una media de 45,75 m/año (0,125 m/d). En la Figura 29, se representa el valor de K_A para cada año de estudio.

Aunque principalmente es la K_{DBO5} la constante que se utiliza para el cálculo de la superficie de humedal necesaria, también se pueden usar otras basadas en otros parámetros (SST, N_t , P_t). Kadlec y Knight (1996), basándose en los datos de los Humedales Artificiales de Norteamérica calculan los siguientes valores: K_{SST} 2,74 m/d, K_{N_t} 0,074 m/d ó K_{P_t} 0,0329 m/d. La más utilizada, a parte de la de K_{DBO5} , es la referente al nitrógeno. En este sentido, Brix (1998), a partir de los datos de Dinamarca, calcula una K_{N_t} de 0,033 m/d y Vymazal (2008) en cambio habla de valores de K_{N_t} de 0,025 m/d. A partir de los valores obtenidos en la investigación se ha calculado la K_{N_t} para la carga superficial de nitrógeno en el HV1, obteniéndose una media de 17,16 m/año ó 0,047 si la expresamos en m/d. El valor obtenido está dentro del rango citado en la bibliografía.

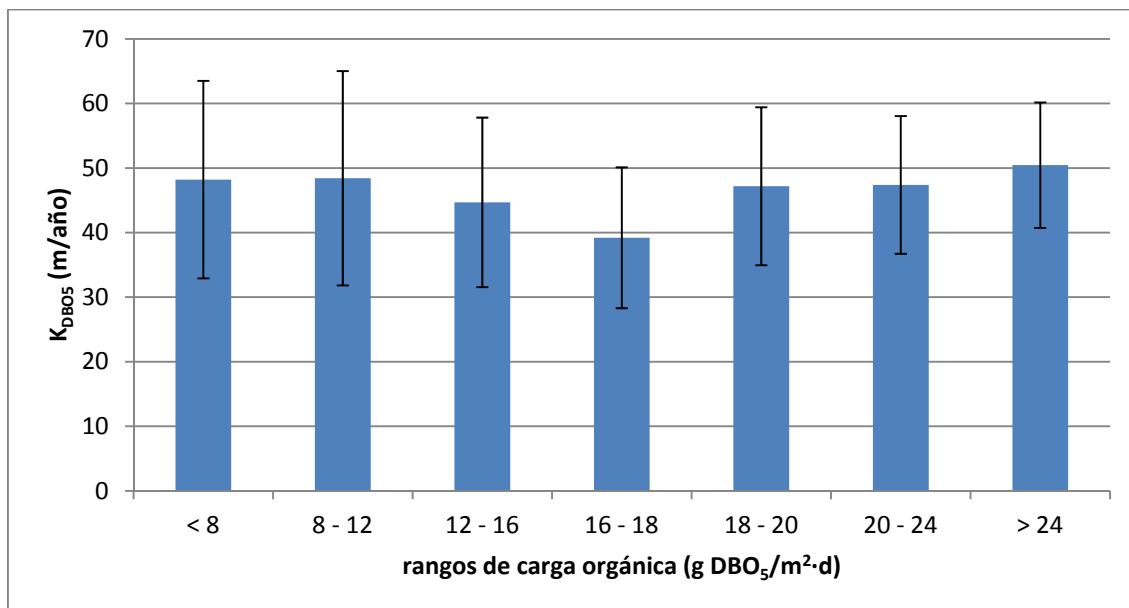


Figura 28. Valores de la K_{DBO5} para el HV1 en diferentes rangos de carga

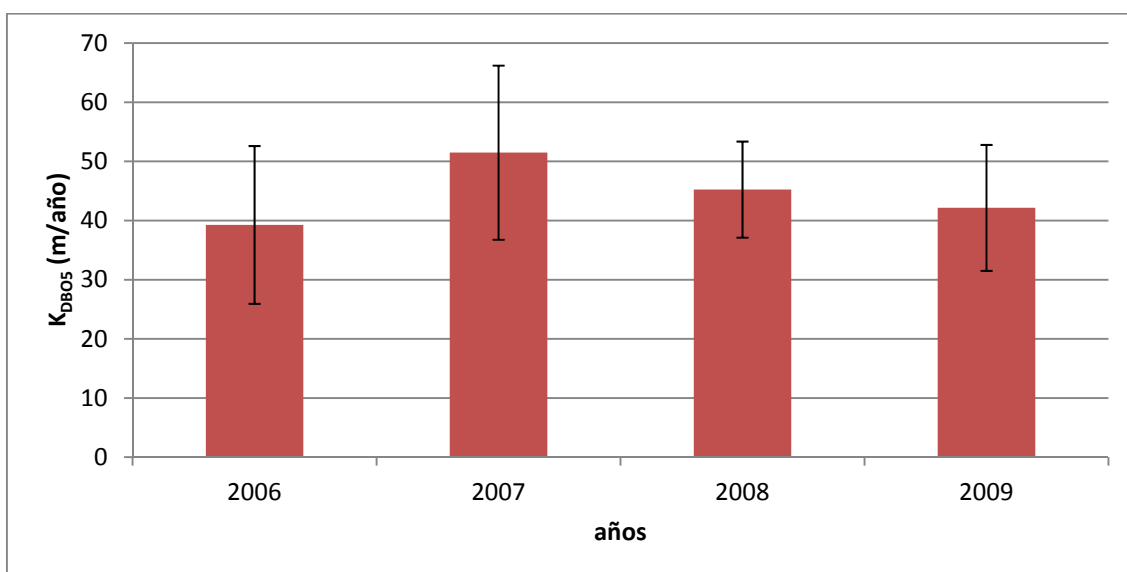


Figura 29. Valores de la K_{DBO5} para el HV1 durante los años de estudio

3.1.2 Humedal Vertical HV3

3.1.2.1 Condiciones operativas

Este humedal se alimenta con agua residual procedente del tanque Imhoff. Los parámetros operacionales se muestran en las Tabla 36 y Tabla 37.

Tabla 36. Valores operacionales del HV3

	Carga orgánica superficial (g $DBO_5/m^2 \cdot d$)	Carga de sólidos superficial (g SST/ $m^2 \cdot d$)	Carga de nitrógeno superficial (g N/ $m^2 \cdot d$)	Carga de fósforo superficial (g P/ $m^2 \cdot d$)
VALOR MEDIO	10,6	5,3	2,5	0,4
DESV. STANDAR	4,5	1,7	0,9	0,1
VALOR MÁXIMO	20,7	41,5	4,9	0,7
VALOR MÍNIMO	2,2	0,0	0,1	0,1
Nº DE VALORES	112	122	57	64
Valores bibliográficos	10,6	6,8	3,9	0,5

Como se aprecia en la tabla anterior, y al igual que en el HV1, se ha operado con valores muy cercanos a los habituales (Vymazal, 2008).

Tabla 37. Valores operacionales del HV3 (continuación)

	Caudal (m ³ /d)	Carga hidráulica superficial (m ³ /m ² *d)
VALOR MEDIO	13,3	0,046
DESV. STANDAR	2,2	0,008
VALOR MÁXIMO	21,3	0,074
VALOR MÍNIMO	8,6	0,030
Nº DE VALORES	124	124

3.1.2.2 Rendimientos de eliminación

En la Tabla 38 y Tabla 39 se muestran los rendimientos de depuración del HV3 en cuanto a eliminación de DQO, DBO₅, SST, Nt y Pt. Se toman como valores de entrada los correspondientes a la salida del tanque Imhoff, vistos en un apartado anterior.

Tabla 38. Valores del efluente y rendimiento del HV3

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	82	88	21	94	23	91
DESV. TÍPICA	31	6	14	4	25	11
VALOR MÁXIMO	212	100	65	100	192	100
VALOR MÍNIMO	30	63	< 13	78	< 10	4
Nº DE VALORES	125	126	111	110	125	124

Tabla 39. Valores del efluente y rendimiento del HV3 (continuación)

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	22,5	60	8,5	5
DESV. TÍPICA	8,6	16	2,7	23
VALOR MÁXIMO	41,7	87	15,8	38
VALOR MÍNIMO	3,0	11	3,4	-75
Nº DE VALORES	63	49	70	55

De acuerdo con lo comentado anteriormente para el HV1, a continuación se representa carga orgánica superficial de entrada ($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{d}$) frente a carga orgánica superficial eliminada, para la correcta determinación del rendimiento de eliminación de DBO_5 . De acuerdo a la Figura 30 este rendimiento es del 91%.

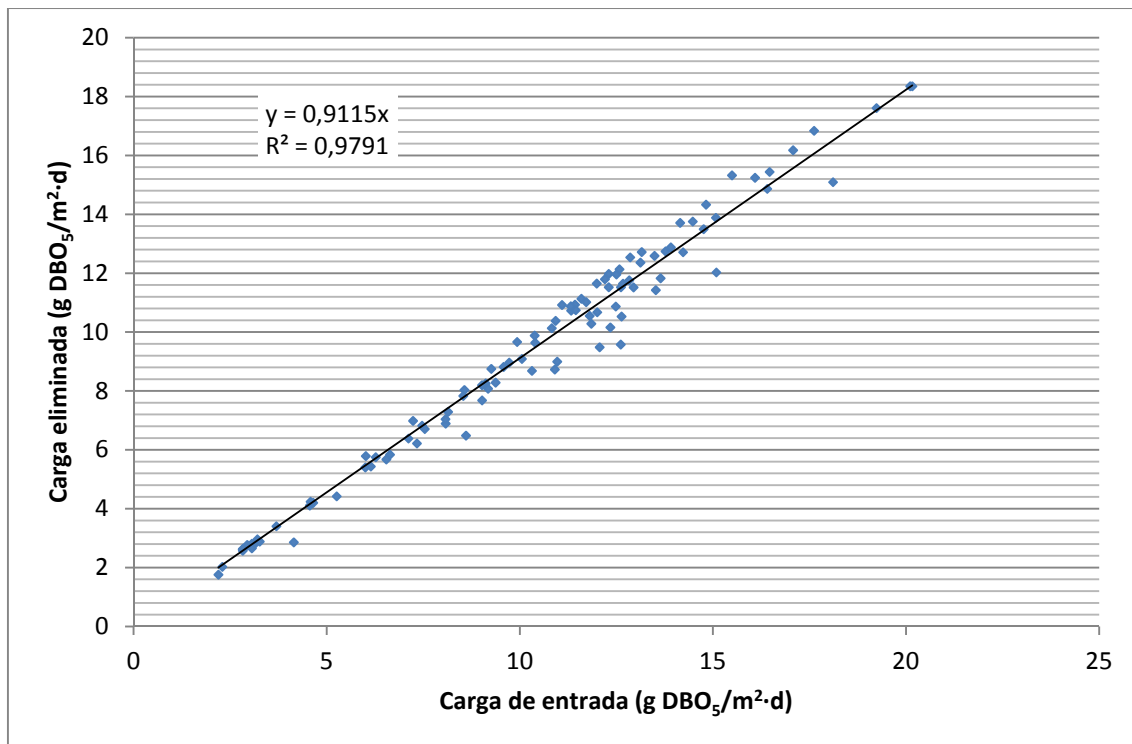


Figura 30. Carga orgánica eliminada frente a carga de entrada en el HV3

Si se representa la DBO_5 de entrada con relación a la de salida (Figura 31), se observa que durante todo el período de ensayo este humedal ha presentado un comportamiento muy robusto.

Como en el caso del HV1, también se ha calculado el porcentaje de carga eliminada de sólidos y de nitrógeno. Respecto a la de sólidos se ha alcanzado un rendimiento del 83% (Figura 32). En el caso del nitrógeno, y de acuerdo a la Figura 33, se ha alcanzado un rendimiento del 61%, valor similar al obtenido en el HV1 y similar a los habituales en este tipo de humedales.

Resaltar que el HV3 presenta mejor comportamiento que el HV1 en cuanto a eliminación de contaminantes y eso a pesar de estar sin plantar. Se presume por tanto que la diferencia de granulometría entre ambos es el factor diferencial que provoca dichos mejores resultados.

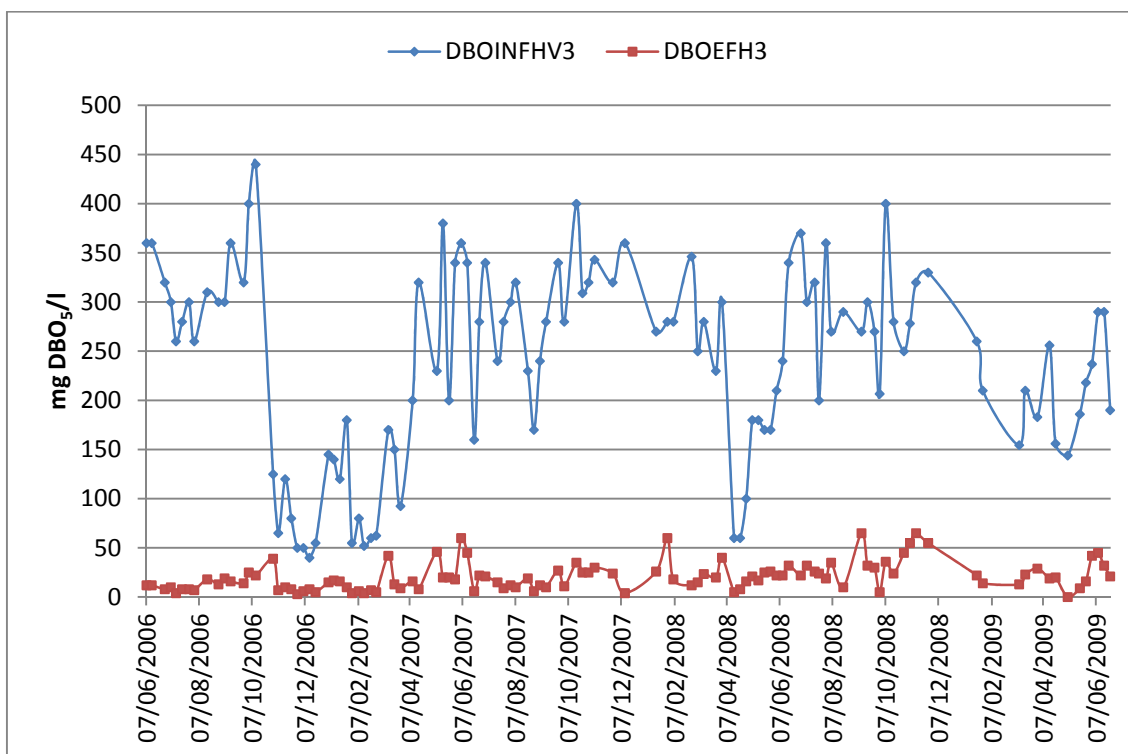


Figura 31. Concentración de DBO₅ a la salida y salida del HV3

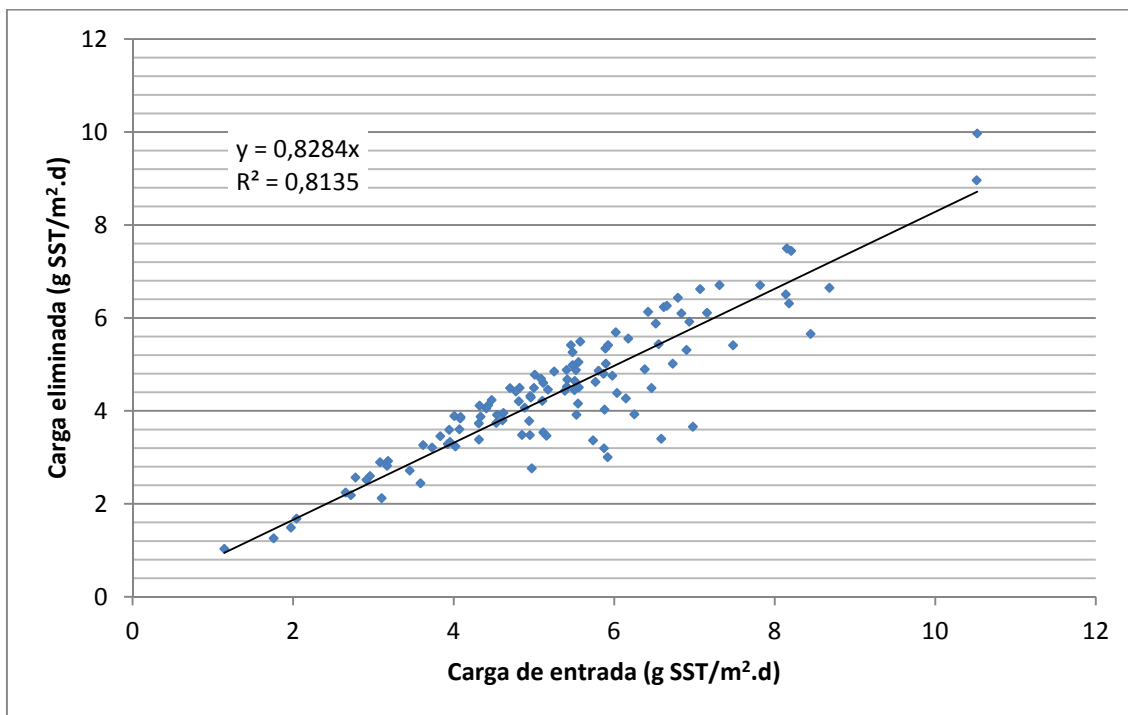


Figura 32. Carga eliminada de SST frente a carga de entrada en el HV3

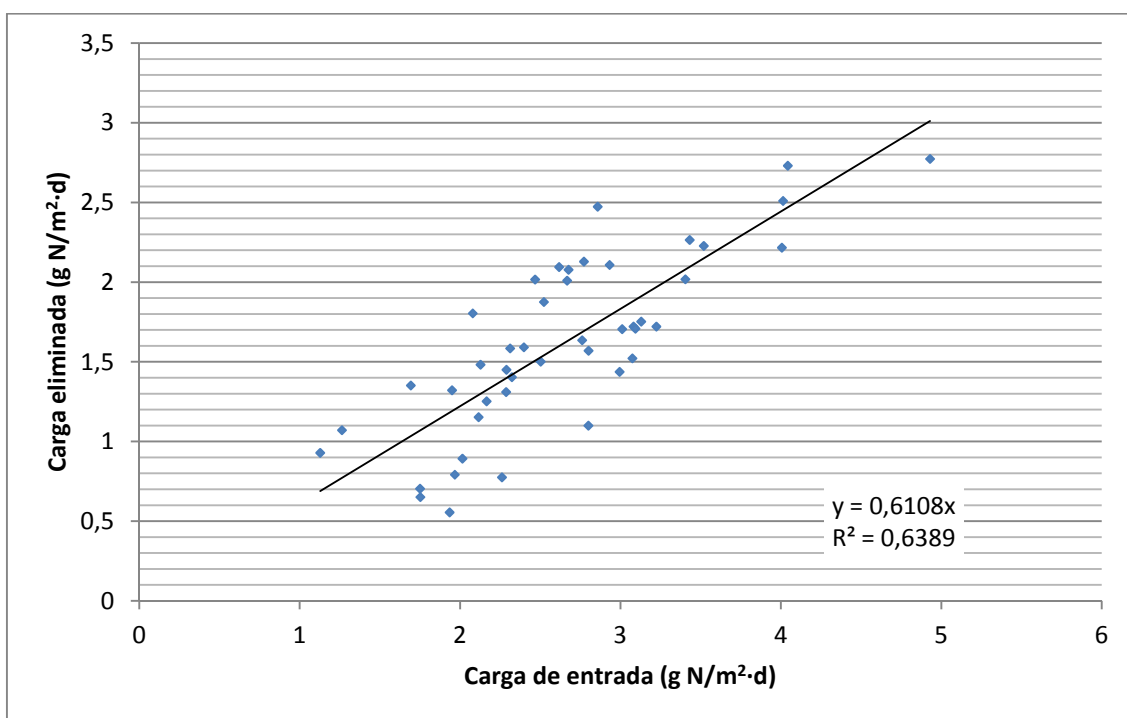


Figura 33. Carga eliminada de Nt frente a carga de entrada en el HV3

3.1.2.3 Rendimientos de depuración globales

Para evaluar los rendimientos globales de depuración (que suelen ser los que aparecen en la bibliografía) se han calculado los porcentajes de reducción tomando como valores del influente los de entrada al tanque Imhoff y los del efluente, los de salida del Humedal Artificial (Tabla 40).

Tabla 40. Valores globales obtenidos en el HV3

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	82	88	21	95	23	90
DESV. TÍPICA	31	6	14	4	25	14
VALOR MÁXIMO	212	100	65	100	192	100
VALOR MÍNIMO	30	63	< 13	78	< 10	-8
Nº DE VALORES	125	127	111	127	125	127
Valores bibliográficos	-	80-90	-	90-95	-	90-95

Tabla 41. Valores globales obtenidos en el HV3 (continuación)

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	22,5	64	8,5	24
DESV. TÍPICA	8,6	16	2,7	18
VALOR MÁXIMO	41,7	94	15,8	55
VALOR MÍNIMO	3,0	22	3,4	-32
Nº DE VALORES	63	61	70	67
Valores bibliográficos	-	60-70	-	20-30

Los porcentajes de reducción obtenidos en el HV3 están en concordancia con los citados en la bibliografía (Salas, 2007).

3.1.2.4 Cumplimiento de la normativa de vertidos

Por lo que respecta a los valores absolutos de concentración la Directiva 91/271/CEE se cumple tanto en lo referente a la DQO (82 mg/l), como a los SST (23 mg/l) y a la DBO₅ (21 mg/l). Igualmente en este humedal se cumple con los porcentajes de reducción exigidos.

Tabla 42. Comparativa con los parámetros de vertido en el HV3

Parámetros	Valores legales		Valores obtenidos	
	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción	Concentración	Porcentaje medio de reducción
DBO ₅	25 mg/l	70-90 %	21 mg/l	95 %
DQO	125 mg/l	75 %	82 mg/l	88 %
SST	35 mg/l	90 %	23 mg/l	90 %

En cuanto a los parámetros de vertido referentes a eliminación de nutrientes, ni en caso del nitrógeno ni en el fósforo se estaría de acuerdo a la legislación vigente para vertidos procedentes de aglomeraciones mayores de 2.000 h.e. y que se efectúen en zonas sensibles.

Tabla 43. Comparativa con los parámetros de vertido en el HV3

Parámetros	Valores legales		Valores obtenidos	
	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción	Concentración	Porcentaje medio de reducción
Nt	10-15 mg/l	70-80 %	22 mg/l	64 %
Pt	1-2 mg/l	80 %	9 mg/l	24 %

Como se observa el Humedal Artificial HV3 depura conforme a los parámetros de vertido para zona normal, no cumpliendo con la eliminación de nutrientes exigida si se vertiera en zona sensible los efluentes depurados de aglomeraciones urbanas mayores de 2.000 h.e.

Aunque la tabla anterior nos da una buena idea del cumplimiento del sistema frente a la normativa, no menos importante es saber que porcentajes de veces el efluente está en parámetro de vertido. En las figuras que se muestran a continuación se representan los distintos valores (para DBO₅, DQO, SST y Nt) que se encuentran por debajo y por encima de los límites permitidos.

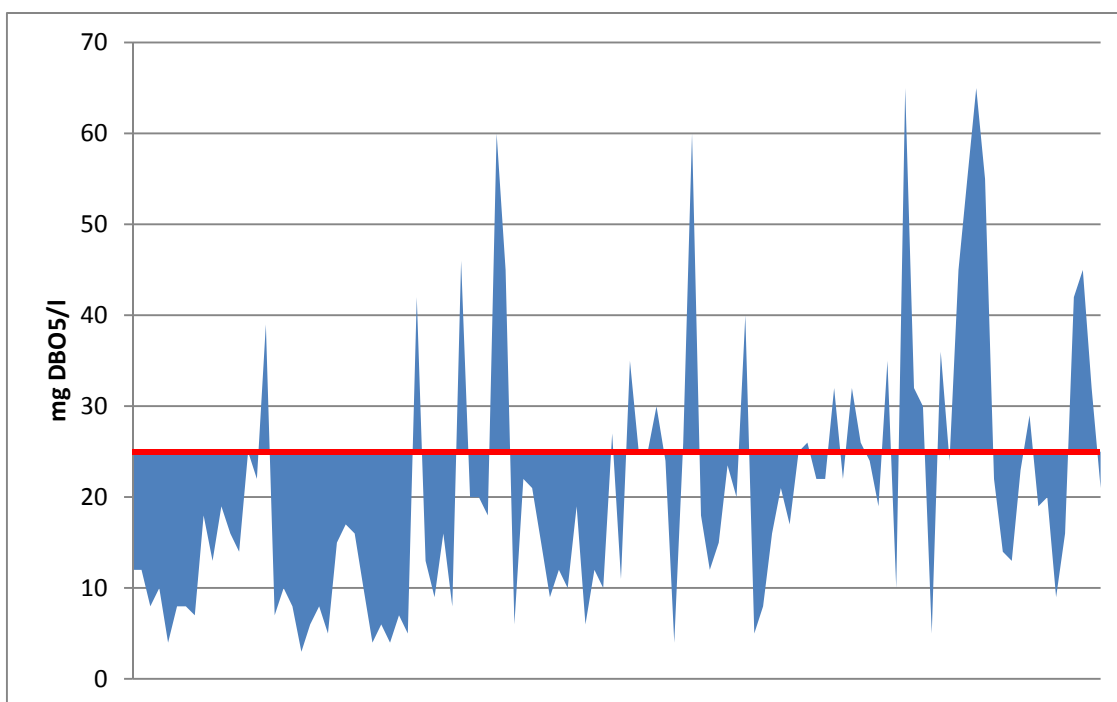


Figura 34. Valores de concentración de DBO₅ a lo largo del estudio en el HV3

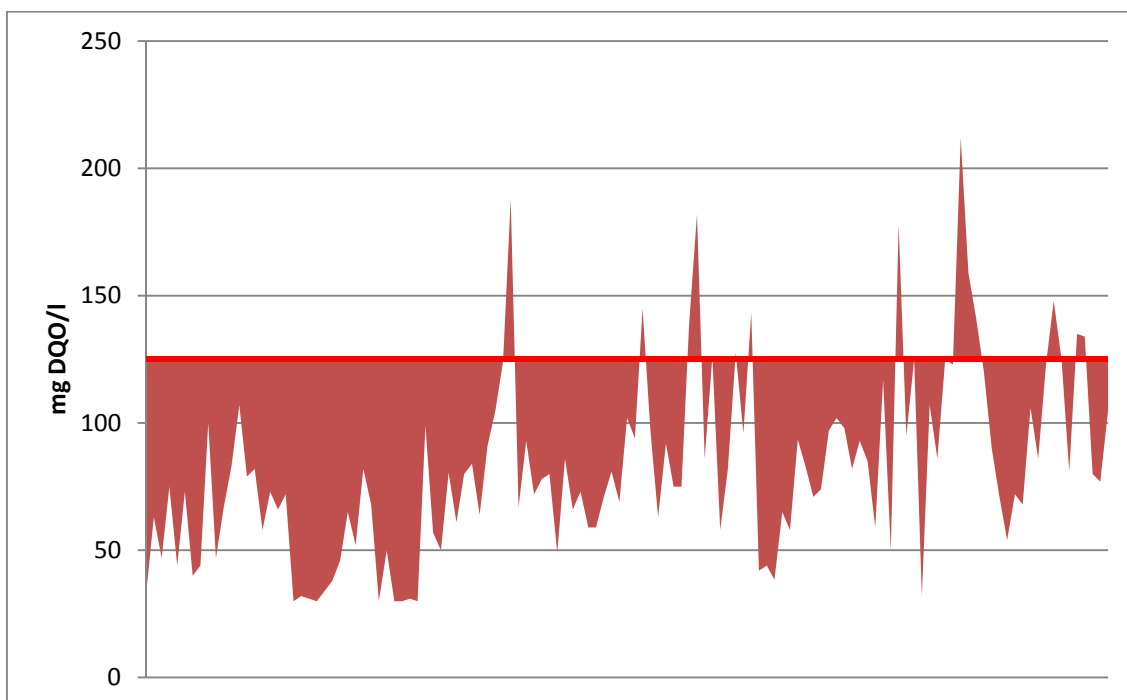


Figura 35. Valores de concentración de DQO a lo largo del estudio en el HV3

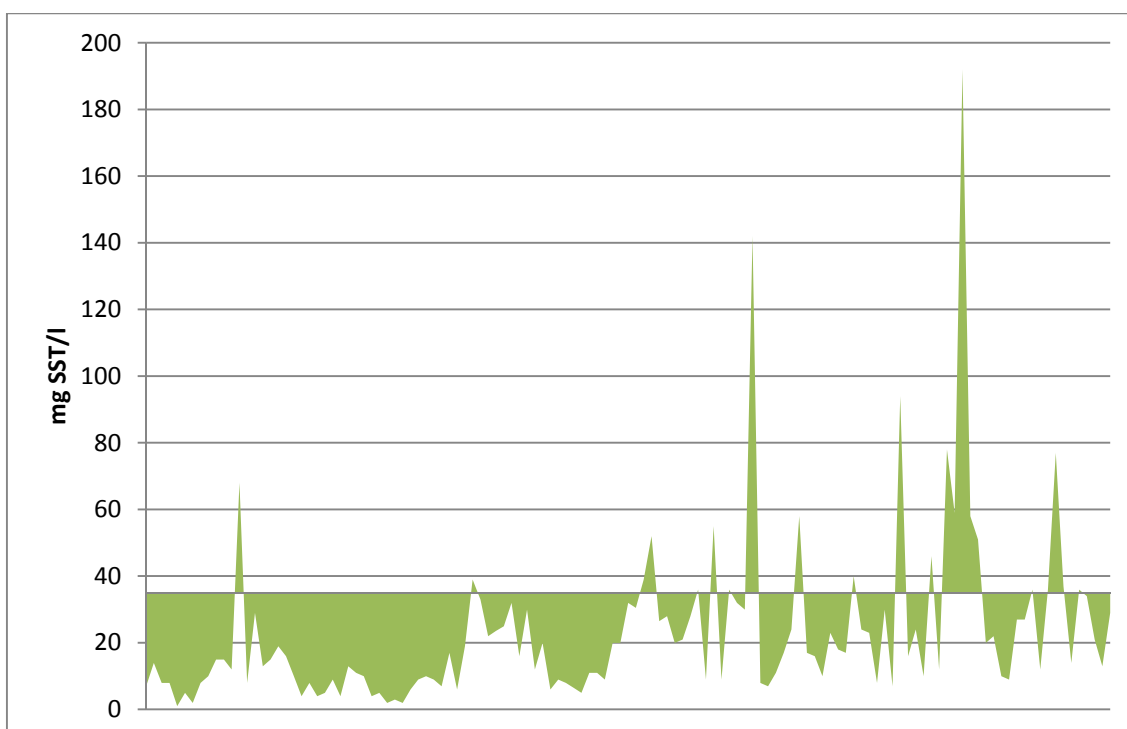


Figura 36. Valores de concentración de SST a lo largo del estudio en el HV3

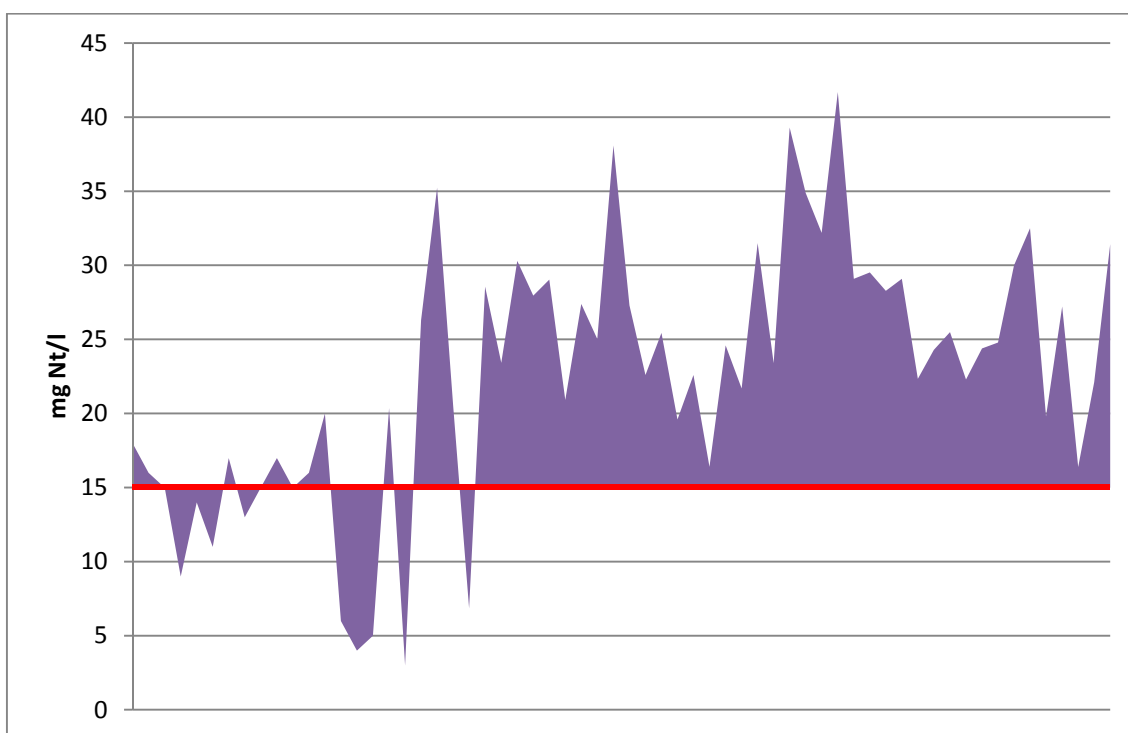


Figura 37. Valores de concentración de Nt a lo largo del estudio en el HV3

En la Tabla 44Tabla 45 se resumen los porcentajes de valores que en la investigación han estado por debajo de los límites legales de vertido.

Tabla 44. Porcentajes de valores dentro de los límites de vertido en el estudio del HV3

	DBO ₅	DQO	SST	Nt
Porcentaje (%)	74	89	85	21

Estos valores tan altos de cumplimiento muestran la gran estabilidad del sistema a lo largo del estudio.

Como se puede comprobar de todos los datos obtenidos a lo largo de la investigación, ambos humedales verticales responden favorablemente a las cargas operadas y cumplen con los parámetros legales de vertidos. A pesar de que el HV1 está plantado y el HV3 no lo está, es este último el que mejores rendimiento alcanza. Es por esto que se presume que la diferencia en la granulometría de su sustrato es la que condiciona estos resultados, quedando la presencia de vegetación en un papel secundario.

Ambos sistemas demuestran gran robustez e inercia de tratamiento frente a las variaciones de carga, siendo nuevamente el HV3 el que mejor respuesta da en todo momento.

A pesar de no cumplir en cuanto a eliminación de nutrientes, presentan ambos buen porcentaje de eliminación de nitrógeno (en los dos por encima del 60 %), por lo que a priori permite predecir que con un tratamiento complementario adicional estarían en disposición de llegar a límites de vertido. No es el caso del fósforo, que tal como se aprecia en los resultados, son sistemas poco eficientes en la eliminación de este contaminante.

3.1.2.5 Cálculo de la constante K_A

A partir de los valores obtenidos en la investigación se ha calculado la K_A para el HV3 durante el período de estudio. En la Figura 38 se representan los valores obtenidos para distintos rangos de carga orgánica en el HV3, presentando una media de 49,28 m/año (0,135 m/d). En la Figura 39 se representa la media anual de la K_A obtenida durante el estudio.

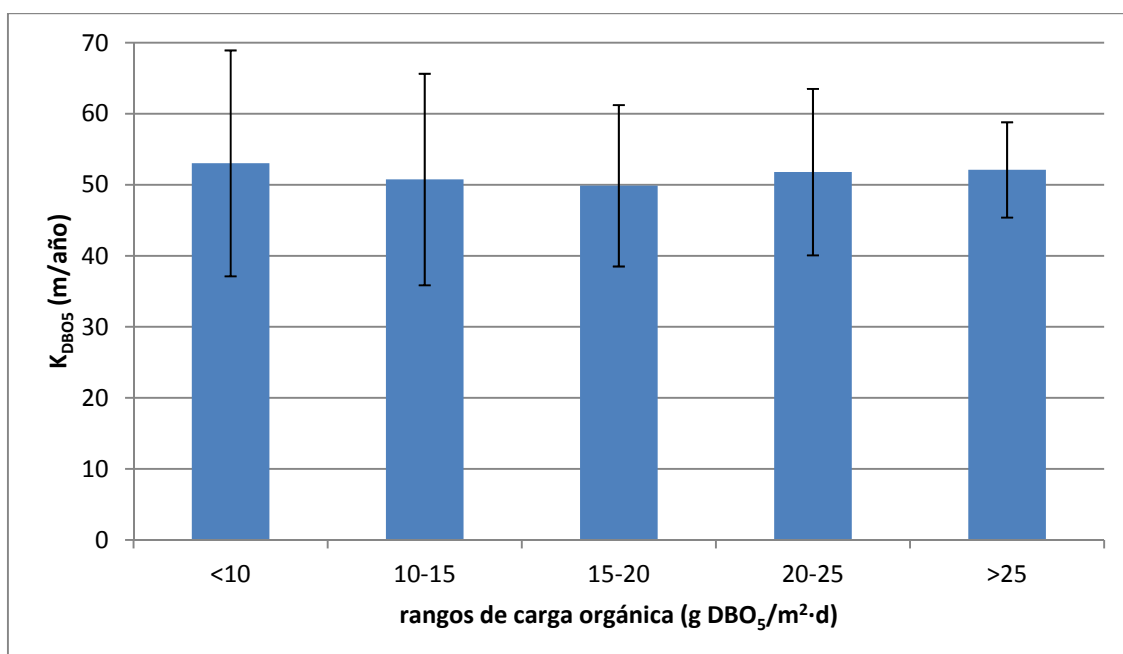


Figura 38. Valores de la K_{DBO_5} para el HV3 en diferentes rangos de carga

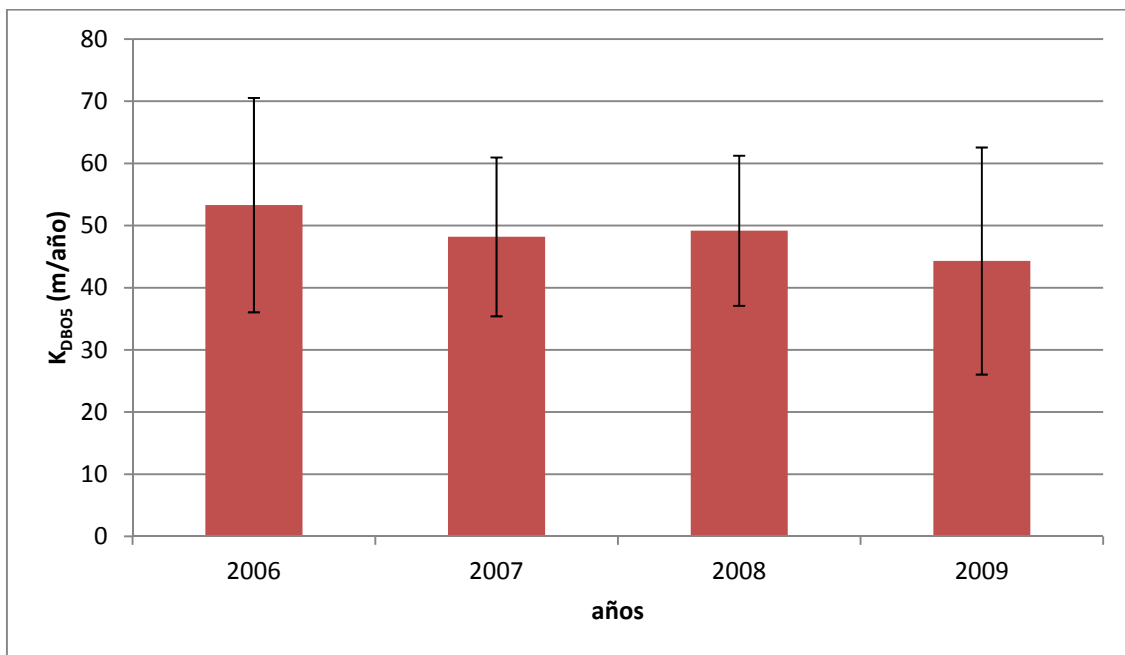


Figura 39. Valores de la K_{DBO5} para el HV3 durante los años de estudio

Igualmente, a partir de los valores obtenidos en la investigación hemos calculado la KN_t para la carga superficial de nitrógeno en el HV3, obteniéndose una media de 18,77 m/año ó 0,051 si la expresamos en m/d. El valor obtenido está dentro del rango citado en la bibliografía.

3.2 Humedal de Flujo Subsuperficial Horizontal

3.2.1 Humedal Horizontal HH2

3.2.1.1 Condiciones operativas

Este humedal se alimenta con agua residual procedente del tanque Imhoff. Los parámetros operacionales se muestran en las Tabla 45 y Tabla 46.

Tabla 45. Valores operacionales del HH2

	Carga orgánica superficial (g DBO ₅ /m ² *d)	Carga de sólidos superficial (g SST/m ² *d)	Carga de nitrógeno superficial (g Nt/m ² *d)	Carga de fósforo superficial (g Pt/m ² *d)
VALOR MEDIO	8,4	4,1	1,9	0,3
DESV. STANDAR	3,7	1,4	0,7	0,1
VALOR MÁXIMO	18,3	8,8	3,2	0,6
VALOR MÍNIMO	2,1	0,8	0,1	0,1
Nº DE VALORES	124	121	57	64
Valores bibliográficos	6,2	5,4	2,4	0,6

Tabla 46. Valores operacionales del HH2 (continuación)

	Caudal (m ³ /d)	Carga hidráulica superficial (m ³ /m ² *d)
VALOR MEDIO	9,9	0,036
DESV. STANDAR	2,0	0,007
VALOR MÁXIMO	17,0	0,061
VALOR MÍNIMO	5,9	0,021
Nº DE VALORES	127	124

Como se aprecia en la tabla anterior, para la carga orgánica, se ha operado con valores algo superiores a los habituales (Vymazal, 2008).

3.2.1.2 Rendimientos de eliminación

En la Tabla 47 y Tabla 48 se muestran los rendimientos de depuración del HH2 en cuanto a eliminación de DQO, DBO₅, SST, Nt y Pt. Se toman como valores de entrada los correspondientes a la salida del tanque Imhoff, ya comentados.

Tabla 47. Valores del efluente y rendimiento del HH2

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	119	82	46	77	13	94
DESV. TÍPICA	49	10	27	18	11	5
VALOR MÁXIMO	278	95	160	99	76	100
VALOR MÍNIMO	42	38	< 13	-5	< 10	67
Nº DE VALORES	127	127	117	117	127	127

Tabla 48. Valores del efluente y rendimiento del HH2

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	45,3	22	8,5	3
DESV. TÍPICA	13,5	17	2,7	30
VALOR MÁXIMO	72,2	71	12,9	82
VALOR MÍNIMO	3,7	-6	1,2	-86
Nº DE VALORES	61	47	70	54

Los rendimientos medios, como en los Humedales anteriores, se han calculado como media aritmética del conjunto de valores obtenidos en las determinaciones analíticas realizadas en la investigación.

Si se representa la carga orgánica superficial de entrada (g/m²·d) frente a la carga orgánica superficial eliminada (Figura 40) se obtiene un rendimiento de 81%.

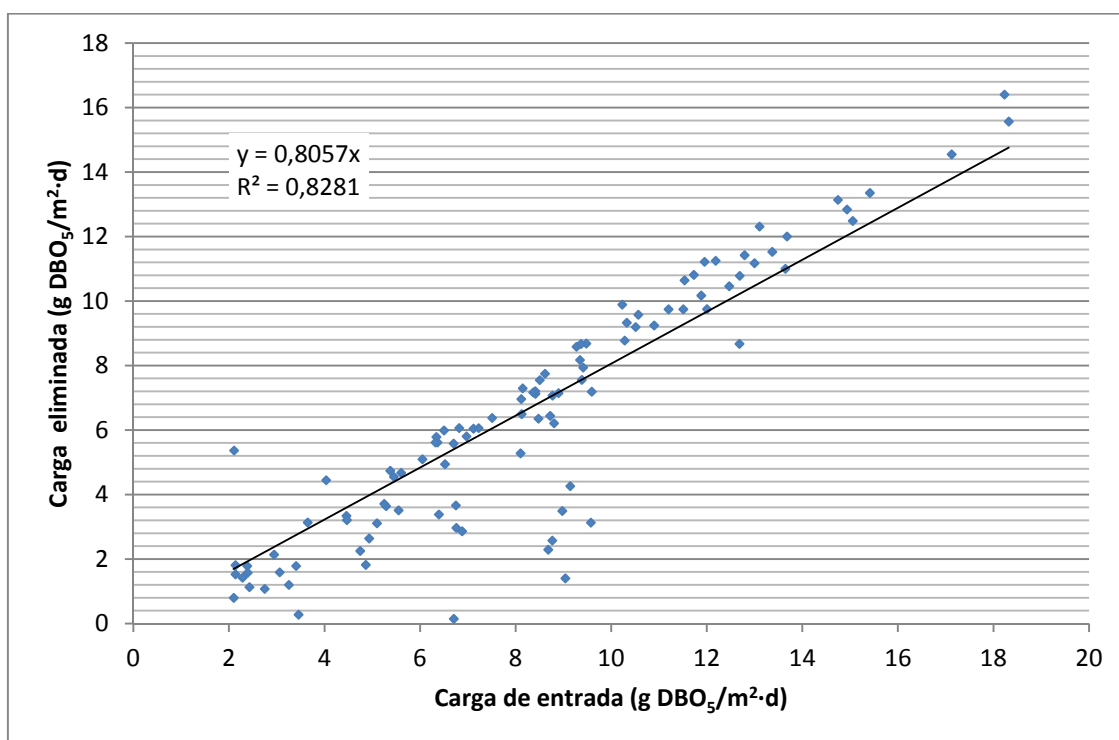


Figura 40. Carga orgánica eliminada frente a carga de entrada en el HH2

En la Figura 41, en la que se representa la DBO₅ de entrada frente a la de salida, se comprueba que existen momentos en la operación del sistema en que su comportamiento no es tan constante como en los Humedales Verticales HV1 y HV3, ya que los valores de DBO₅ de salida experimentan mayores desviaciones. Se puede concluir pues que este Humedal Horizontal ha presentado a lo largo del estudio un comportamiento menos robusto que los Humedales Verticales analizados anteriormente.

En Figura 42 se representa la carga de sólidos de entrada en el HH2 frente a la eliminada, obteniéndose un valor de reducción de dicho parámetro del 90%. Con relación a la eliminación de nitrógeno en este humedal (Figura 43) se alcanzó un rendimiento del 26%, valor que está en consonancia con los recogidos en la bibliografía. Es necesario comentar a este respecto que todos los datos bibliográficos se refieren a humedales horizontales plantados, no siendo así en nuestro caso por lo que era lógico esperar porcentajes bastantes más bajos que los habituales. Esto se debe a que al no estar plantado y alimentarse de forma continua (no era así en el caso de los verticales, en los cuales la alimentación era a pulsos), el sistema está en condiciones permanentes de anaerobiosis, con la consecuente inactividad de las bacterias nitrificantes.

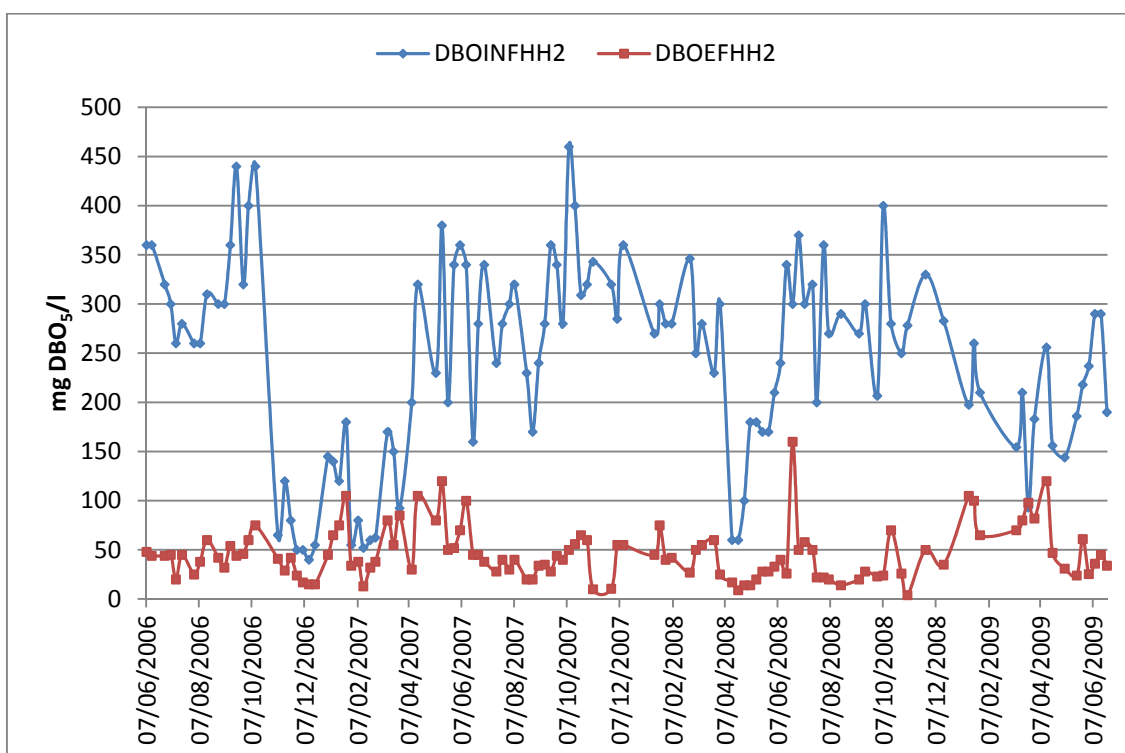


Figura 41. Concentración de DBO a la salida del HH2

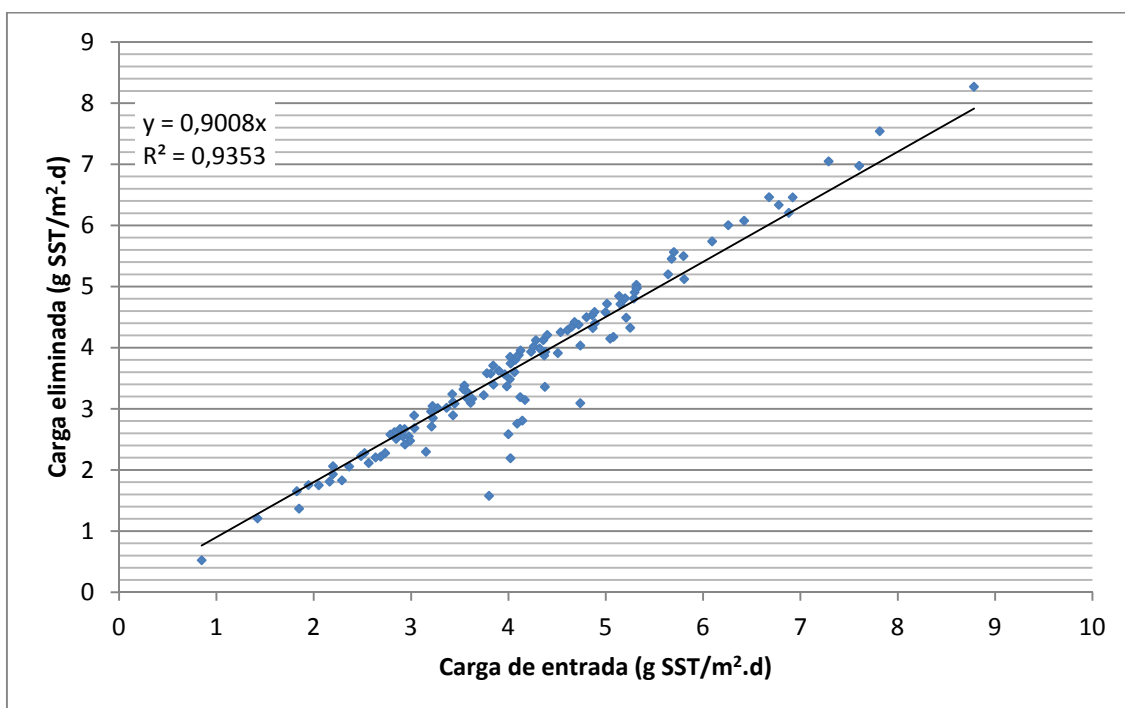


Figura 42. Carga eliminada de SST frente a carga de entrada en el HH2

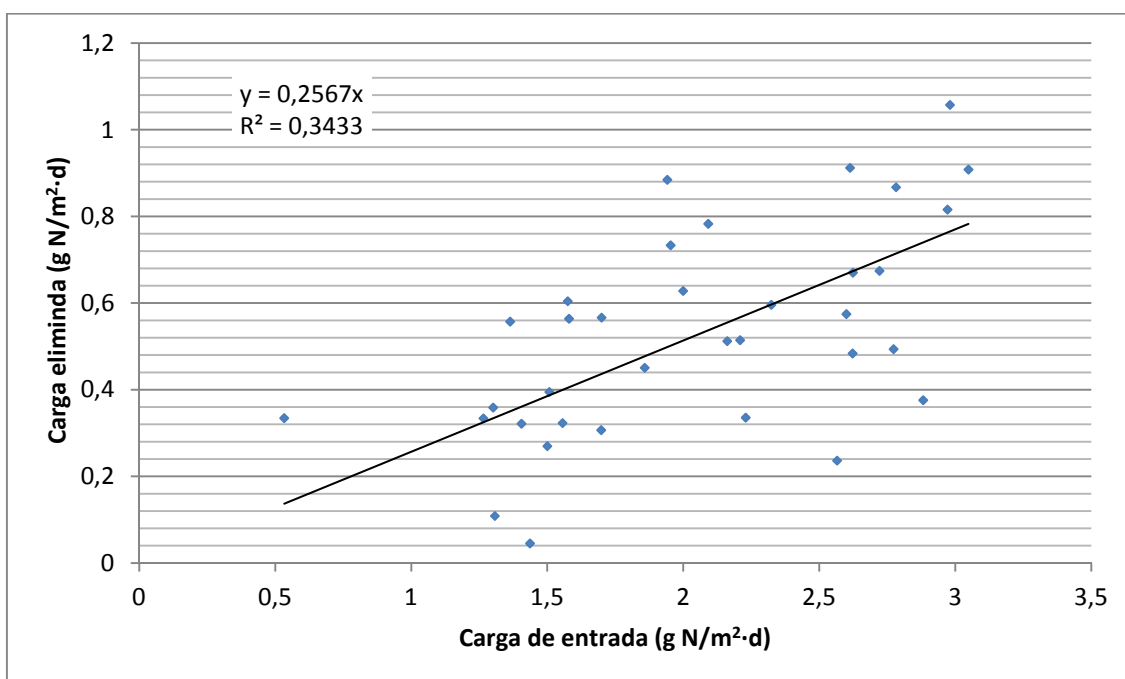


Figura 43. Carga eliminada de Nt frente a carga de entrada en el HH2

3.2.1.3 Rendimientos de depuración globales

Para evaluar los rendimientos globales de depuración (que suelen ser los que aparecen en la bibliografía) se han calculado los porcentajes de reducción tomando como valores del influente los de entrada al tanque Imhoff y los del efluente, los de salida del Humedal Artificial HH2 (Tabla 49 y Tabla 50).

Tabla 49. Valores globales obtenidos en el HH2

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	119	82	46	88	13	94
DESV. TÍPICA	49	10	27	10	11	5
VALOR MÁXIMO	278	95	160	100	76	100
VALOR MÍNIMO	42	38	< 13	55	< 10	67
Nº DE VALORES	127	127	117	127	127	127
Valores bibliográficos	-	80-90	-	85-95	-	85-95

Tabla 50. Valores globales obtenidos en el HH2 (continuación)

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	45,3	28	8,5	22
DESV. TÍPICA	13,5	18	2,7	25
VALOR MÁXIMO	72,2	69	12,9	84
VALOR MÍNIMO	3,7	-17	1,2	-48
Nº DE VALORES	61	58	70	68
Valores bibliográficos	-	20-30	-	20-30

Puede observarse como los porcentajes de reducción obtenidos en el HH2 están en el mismo orden que los citados en la bibliografía para esta modalidad de Humedal.

3.2.1.4 Cumplimiento de la normativa de vertidos

Por lo que respecta a los valores absolutos de concentración la Directiva 91/271/CEE se cumple tanto en lo referente a la DQO (119 mg/l) como a los SST (13 mg/l), no siendo así con relación a la DBO₅ (46 mg/l). En cuanto a porcentajes de reducción, se cumple satisfactoriamente con lo establecido legalmente para todos los parámetros citados anteriormente.

Tabla 51. Comparativa con los parámetros de vertido en el HH2

Parámetros	Valores legales		Valores obtenidos	
	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción	Concentración	Porcentaje medio de reducción
DBO ₅	25 mg/l	70-90 %	46 mg/l	88 %
DQO	125 mg/l	75 %	119 mg/l	82 %
SST	35 mg/l	90 %	13 mg/l	94 %

Por lo que se refiere a los valores de los parámetros relacionados con la presencia de nutrientes, ni en caso del nitrógeno ni en el fósforo se estaría de acuerdo a la legislación vigente para vertidos procedentes de aglomeraciones mayores de 2.000 h.e. y que se efectúen en zonas sensibles.

Tabla 52. Comparativa con los parámetros de vertido en el HH2

Parámetros	Valores legales		Valores obtenidos	
	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción	Concentración	Porcentaje medio de reducción
Nt	10-15 mg/l	70-80 %	45 mg/l	28 %
Pt	1-2 mg/l	80 %	9 mg/l	22 %

En resumen, se puede decir que el HH2 ha depurado conforme a lo exigido en porcentajes mínimos de reducción para zonas calificadas como *normales*. No sería un sistema apropiado para depurar las aguas de aglomeraciones superiores a 2.000 h.e. que vertieran en una zona catalogada como *sensible*.

Aunque la tabla anterior nos da una buena idea del cumplimiento del sistema frente a la normativa, no menos importante es saber que porcentaje de veces el efluente está en parámetro de vertido. En las figuras que se muestran a continuación se representan los distintos valores (para DBO₅, DQO, SST y Nt) que se encuentran por debajo y por encima de los límites permitidos.

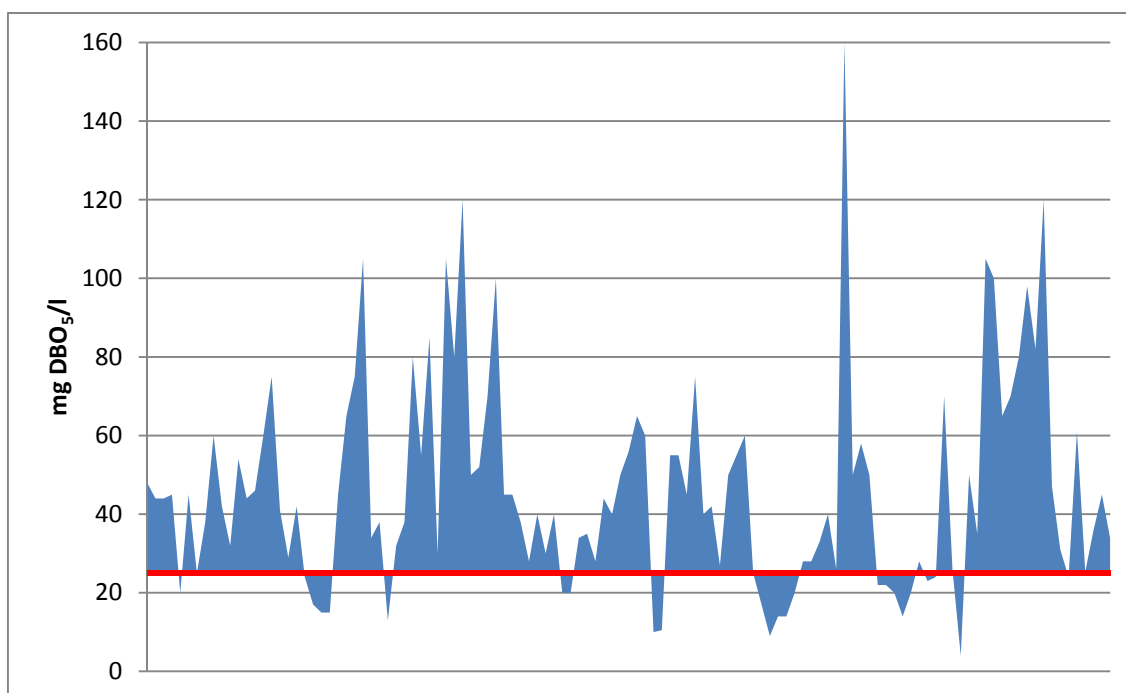


Figura 44. Valores de concentración de DBO₅ a lo largo del estudio en el HH2

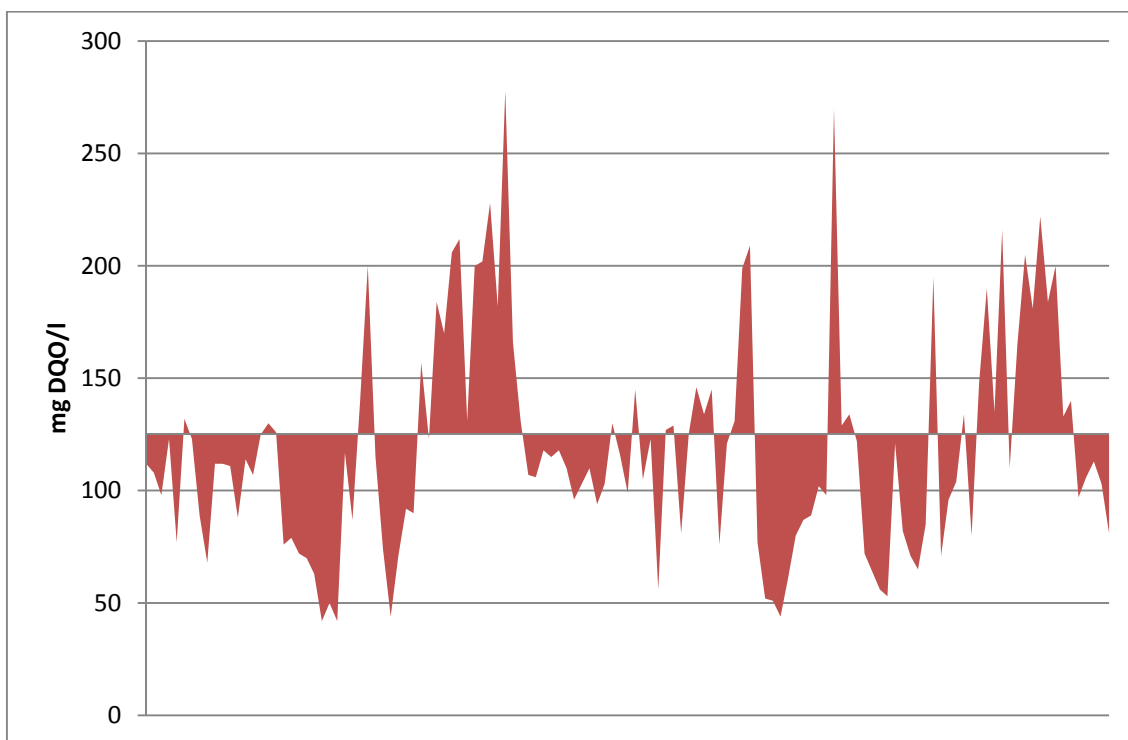


Figura 45. Valores de concentración de DQO a lo largo del estudio en el HH2

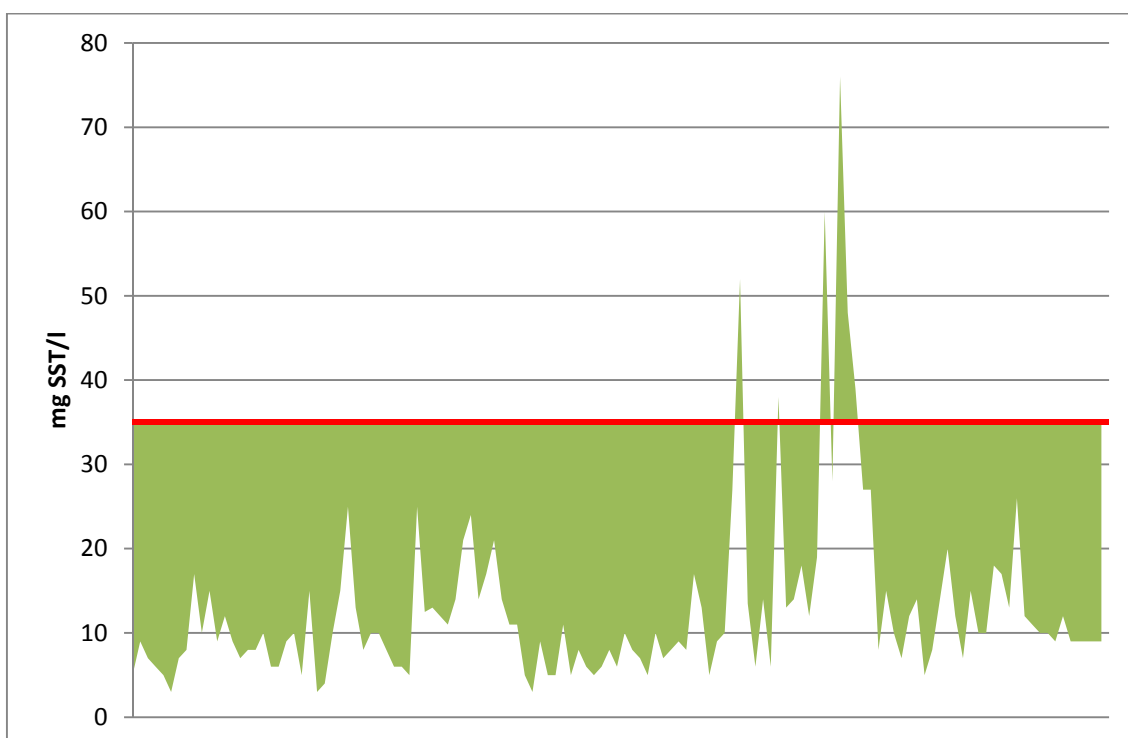


Figura 46. Valores de concentración de los SST a lo largo del estudio en el HH2

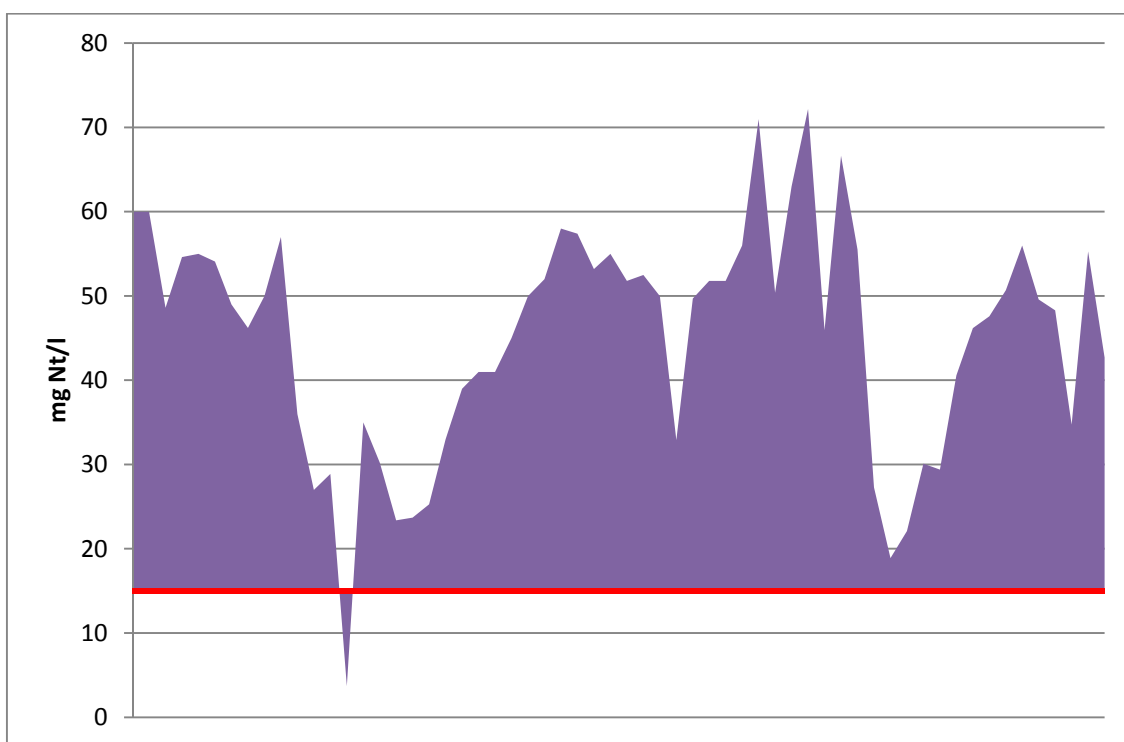


Figura 47. Valores de concentración de los Nt a lo largo del estudio en el HH2

En la Tabla 53 se resumen los porcentajes de valores que en la investigación ha estado por debajo de los límites legales de vertido.

Tabla 53. Porcentajes de valores dentro de los límites de vertido en el estudio del HV3

	DBO ₅	DQO	SST	Nt
Porcentaje (%)	23	64	95	2

Estos valores tan bajos de cumplimiento en la eliminación de materia orgánica y nitrógeno muestran la poca eficiencia del sistema a lo largo del estudio.

Como se desprende de los resultados obtenidos, el Humedal HH2 no alcanza los mismos rendimientos que los Verticales. Esto se debe principalmente a las condiciones de aerobias existentes en los Humedales Verticales frente a las de anaerobiosis de los Horizontales. Sólo el caso de los sólidos, al discurrir la corriente de agua por más volumen filtrante, es comparable en cuanto a eliminación.

3.2.1.5 Cálculo de la constante K_A

A partir de los valores obtenidos en la investigación se ha calculado la K_A para el HH2. En la Figura 48 se representan los valores obtenidos para distintos rangos de carga orgánica en el HH2, presentando una media de 28,42 m/año (0,078 m/d). En la Figura 49 se representa los valores medios anuales de la K_A obtenidas en el estudio.

A partir de los valores obtenidos en la investigación hemos calculado la K_{Nt} para la carga superficial de nitrógeno en el HH2, obteniéndose una media de 5,03 m/año ó 0,014 si la expresamos en m/d. El valor obtenido está dentro del rango citado en la bibliografía.

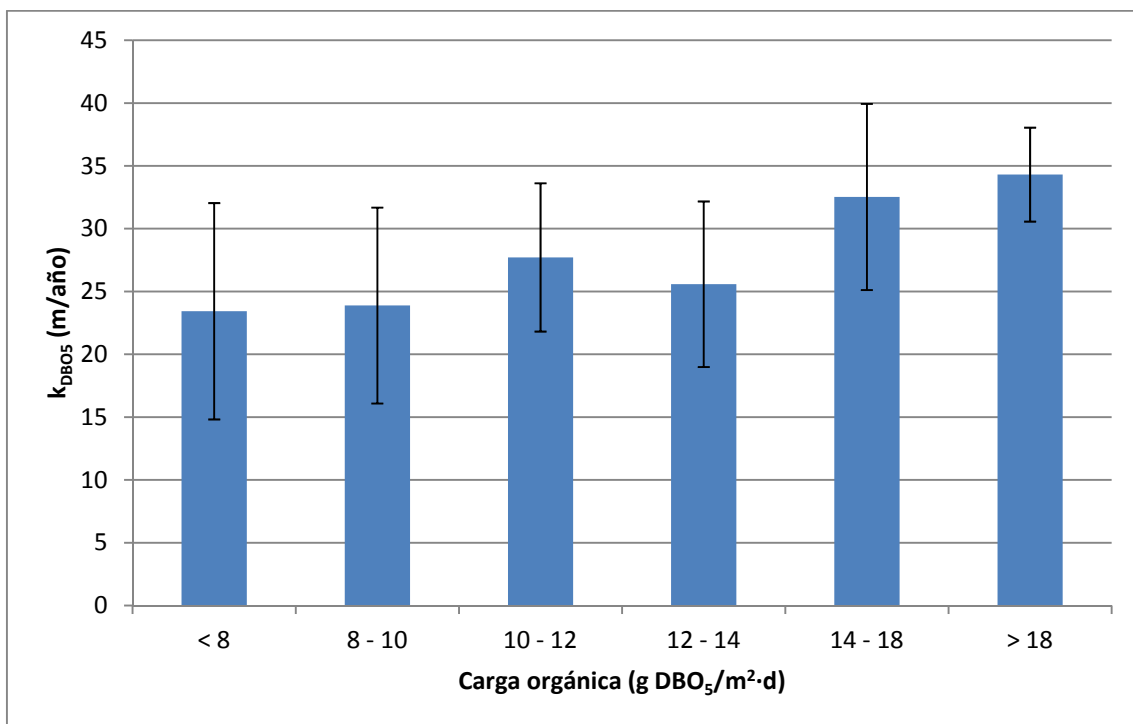


Figura 48. Valores de la K_{DBO_5} para el HH2 en diferentes rangos de carga

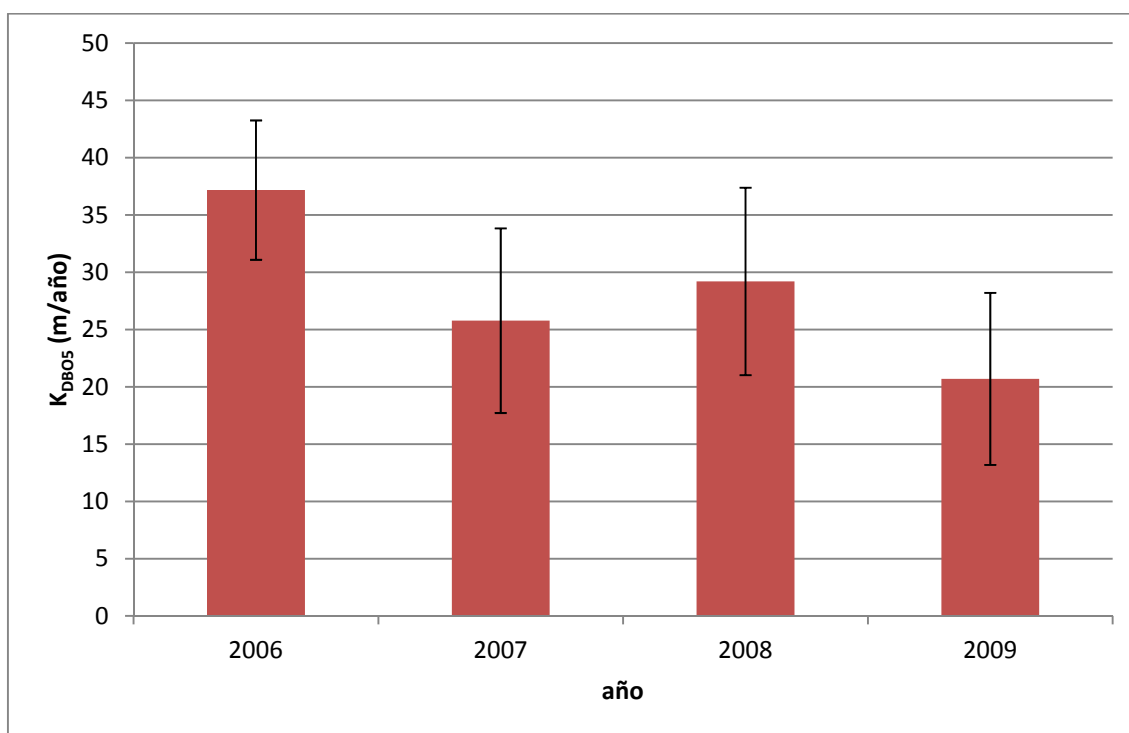


Figura 49. Valores de la K_{DBO5} para el HH2 durante los años de estudio

3.3 Combinaciones de Humedales Artificiales

En este apartado se procede a analizar los resultados obtenidos al estudiar las distintas combinaciones de los Humedales anteriormente descritos con otros operados en serie con cada uno de ellos.

Las combinaciones investigadas son: Humedal Vertical con Humedal Horizontal (HV1+HH5), Humedal Horizontal con Humedal Horizontal (HH2+HH6) y Humedal vertical con Humedal de Flujo Libre o Superficial (HV3+H4). Tales combinaciones se esquematizaban en la Ilustración 86 (página 207).

3.3.1 Combinación HV1 + HH5

3.3.1.1 Condiciones operativas

El Humedal de cabecera de esta combinación (HV1) se alimenta con agua residual procedente del tanque Imhoff. Los parámetros operacionales del HV1 se mostraron anteriormente (Tabla 27, pag. 223 y Tabla 28, pag. 224) y las condiciones operativas del HH5 se exponen a continuación (Tabla 54 y Tabla 55).

Tabla 54. Valores operacionales del HH5

	Carga orgánica superficial (g DBO ₅ /m ² *d)	Carga de sólidos superficial (g SST/m ² *d)	Carga de nitrógeno superficial (g Nt/m ² *d)	Carga de fósforo superficial (g Pt/m ² *d)
VALOR MEDIO	1,7	1,5	1,5	0,5
DESV. STANDAR	1,2	1,1	0,7	0,2
VALOR MÁXIMO	6,0	5,7	5,3	1,3
VALOR MÍNIMO	0,2	0,0	0,3	0,1
Nº DE VALORES	127	127	62	66
Valores bibliográficos	6,2	5,4	2,4	0,6

Tabla 55. Valores operacionales del HH5 (continuación)

	Caudal (m ³ /d)	Carga hidráulica (m ³ /m ² *d)
VALOR MEDIO	14,3	0,062
DESV. STANDAR	2,4	0,011
VALOR MÁXIMO	21,4	0,094
VALOR MÍNIMO	9,5	0,041
Nº DE VALORES	127	127

Dado que el HH5 actúa como tratamiento de afino recibiendo el efluente del HV1, sus condiciones operativas, en lo referente a las cargas de materia orgánica, en suspensión y nutrientes, presentan valores inferiores a las que son habituales en este tipo de humedales cuando actúan como tratamiento secundario.

3.3.1.2 Rendimientos de eliminación

En la Tabla 56 y Tabla 57 se muestran los rendimientos de depuración de la combinación HV1+HH5 en cuanto a eliminación de DQO, DBO₅, SST, Nt y Pt. Se toman como valores de entrada los correspondientes a la salida del tanque Imhoff.

Tabla 56. Valores del efluente y rendimiento de la combinación HV1+HH5

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	48	89	< 13	96	13	89
DESV. TÍPICA	22	5	6	3	11	9
VALOR MÁXIMO	194	100	33	100	55	99
VALOR MÍNIMO	< 30	66	< 13	78	< 10	50
Nº DE VALORES	124	124	124	127	119	119

Tabla 57. Valores del efluente y rendimiento de la combinación HV1+HH5 (continuación)

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	13,0	75	7,9	17
DESV. TÍPICA	6,1	13	4,4	34
VALOR MÁXIMO	26,7	97	17,7	87
VALOR MÍNIMO	< 1	25	< 1	-54
Nº DE VALORES	63	55	66	62

El comportamiento del HH5 como unidad individualizada, en cuanto a eliminación de DQO, DBO₅, SST, Nt y Pt, se presenta en la Tabla 58 y Tabla 59, en las que los porcentajes de reducción se calculan en base a los valores del efluente del HV1.

Tabla 58. Valores del efluente y rendimiento del HH5

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	48	48	9	64	13	32
DESV. TÍPICA	22	20	6	25	11	63
VALOR MÁXIMO	194	100	33	100	55	95
VALOR MÍNIMO	< 30	-38	< 13	-13	< 10	-22
Nº DE VALORES	124	119	124	125	119	114

Tabla 59. Valores del efluente y rendimiento del HH5 (continuación)

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	13,0	46	7,9	11
DESV. TÍPICA	6,1	24	4,4	44
VALOR MÁXIMO	26,7	97	17,7	87
VALOR MÍNIMO	< 1	-4	< 1	-14
Nº DE VALORES	63	57	66	53

La Figura 50 muestra la carga orgánica superficial de entrada frente a la eliminada. El valor de la pendiente, y por tanto el porcentaje de reducción obtenido en cuanto a eliminación de materia orgánica es del 75%. Se ha tomado como carga de entrada el valor obtenido a partir del efluente

del HV1, de esta forma, al tratarlo como unidad individualizada, se podrá comparar con los resultados obtenidos en el otro Humedal en serie (el HH6). Este, a priori, bajo porcentaje de reducción de la materia orgánica se puede deber tanto a las bajas concentraciones de DBO_5 con las que estamos operando (llegándose en ocasiones a estar por debajo del límite de detección) que pueden llevar a error en los cálculos de los porcentajes; como a que dicha materia orgánica tiene mayor porcentaje de “no biodegradable”.

Se han realizado los mismos cálculos para la carga de sólidos, obteniéndose un porcentaje de reducción del 89% (Figura 56). Con relación a la eliminación de nitrógeno en este Humedal (Figura 52) se ha alcanzado un rendimiento del 52%, valor que se encuentra por encima de lo habitual, la bibliografía cita valores entorno 20-30% de carga de nitrógeno eliminada (Salas, 2007), en humedales horizontales operando de forma aislada.

Se observa que los rendimientos alcanzados en la eliminación de nitrógeno son bastante más superiores al horizontal HH2, esto es debido a que este humedal es alimentado de un vertical con lo cual se han dado los procesos típicos de nitrificación. Dándose en el HH5 los típicos de desnitrificación.

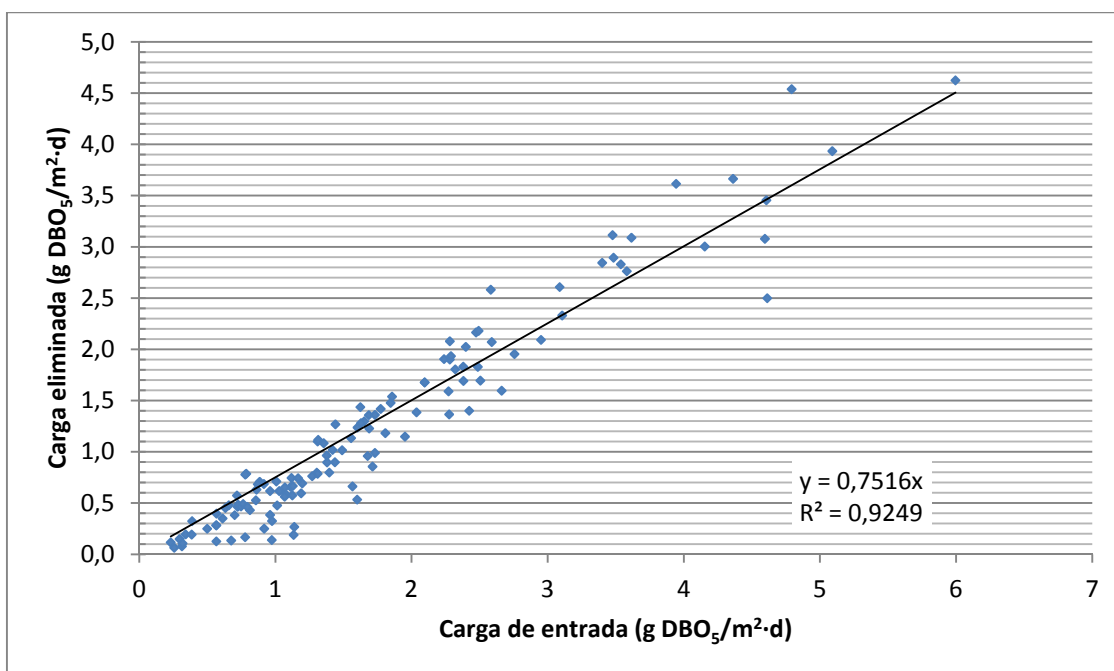


Figura 50. Carga orgánica eliminada frente a carga de entrada en el HH5

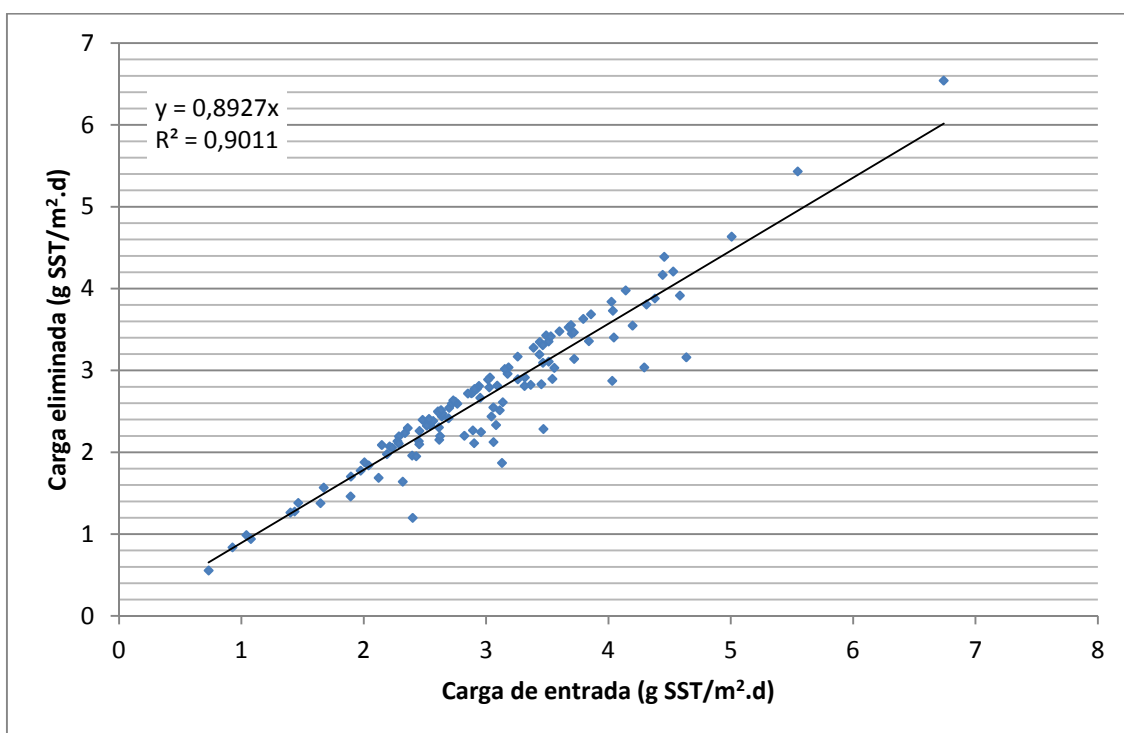


Figura 51. Carga eliminada de SST frente a carga de entrada en el HH5

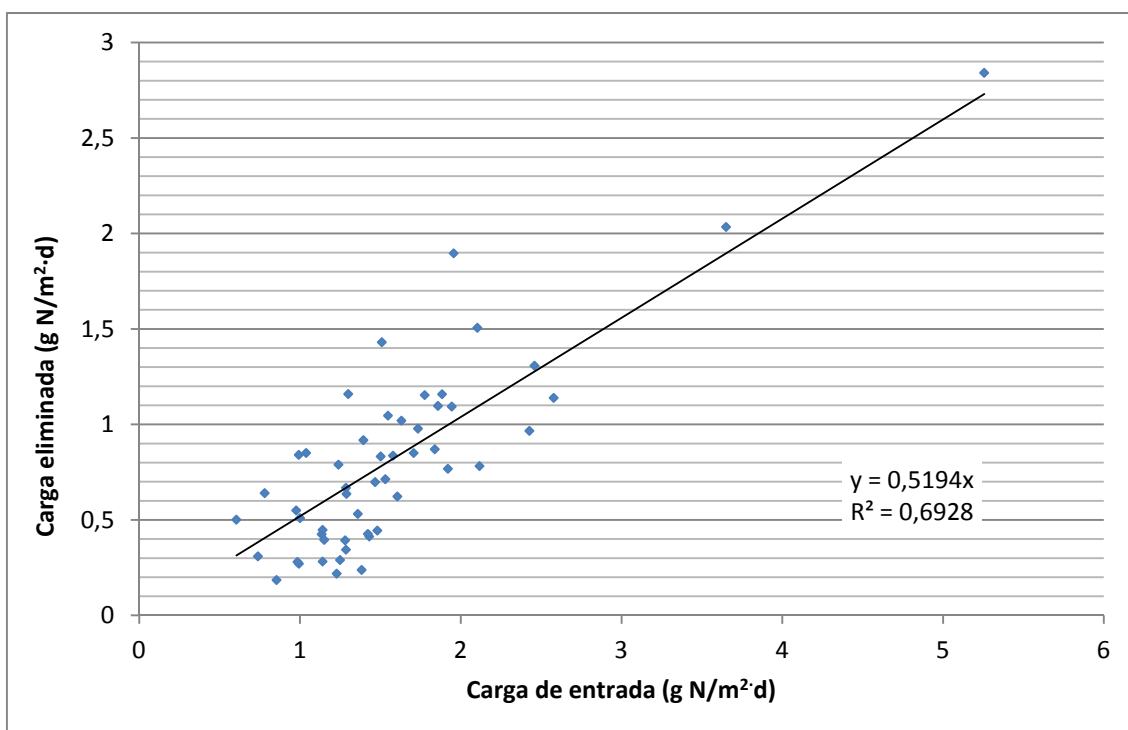


Figura 52. Carga eliminada de Nt frente a carga de entrada en el HH5

3.3.1.3 Rendimientos de depuración globales

Para evaluar los rendimientos globales de depuración se consideran los porcentajes tomando como valores del influente los de entrada al tanque Imhoff y los del efluente de la combinación HV1+HH5 (Tabla 60 y Tabla 61).

Tabla 60. Valores globales obtenidos en la combinación HV1+HH5

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	48	93	< 13	98	13	95
DESV. TÍPICA	22	4	6	2	11	6
VALOR MÁXIMO	194	98	33	99	55	100
VALOR MÍNIMO	< 30	73	< 13	88	< 10	61
Nº DE VALORES	124	123	124	124	119	119

Tabla 61. Valores globales obtenidos en la combinación HV1+HH5 (continuación)

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	13,0	78	7,9	31
DESV. TÍPICA	6,1	9	4,4	32
VALOR MÁXIMO	26,7	97	17,7	92
VALOR MÍNIMO	< 1	54	< 1	-31
Nº DE VALORES	63	59	66	66

Para un estudio más detallado del comportamiento de la combinación HV1+HH5 se representa a continuación la evolución de los parámetros analizados a lo largo del estudio en sus distintas etapas.

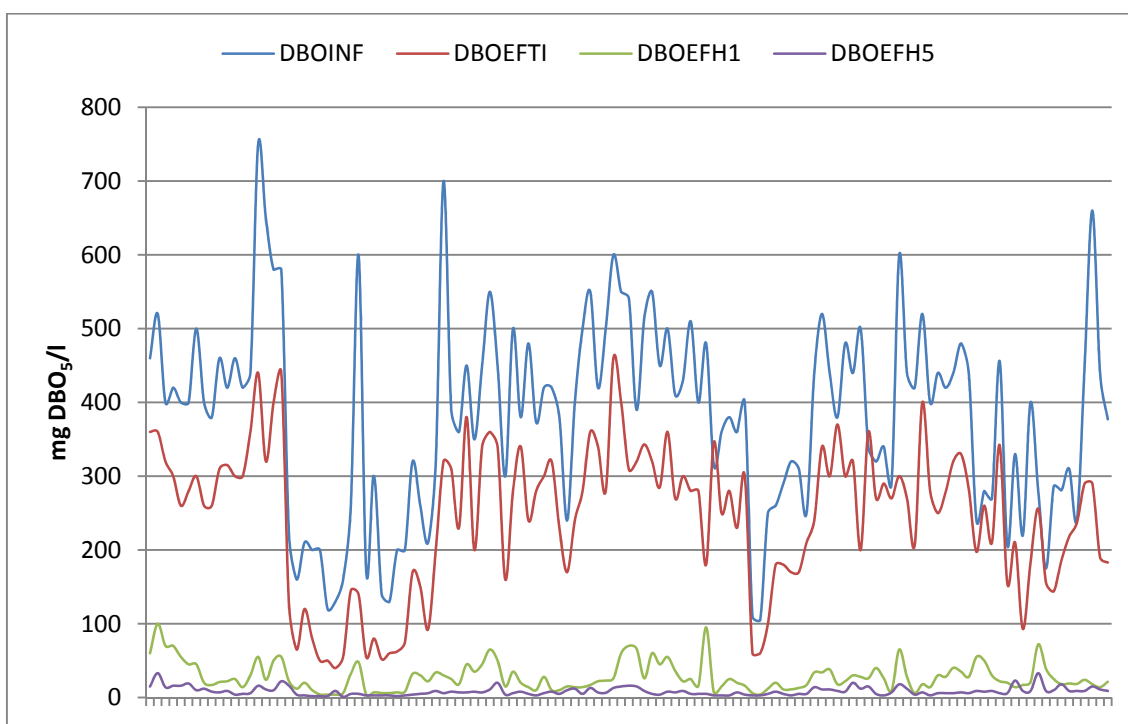


Figura 53. Evolución de la DBO₅ a lo largo del estudio en distintas etapas de la combinación HV1+HH5

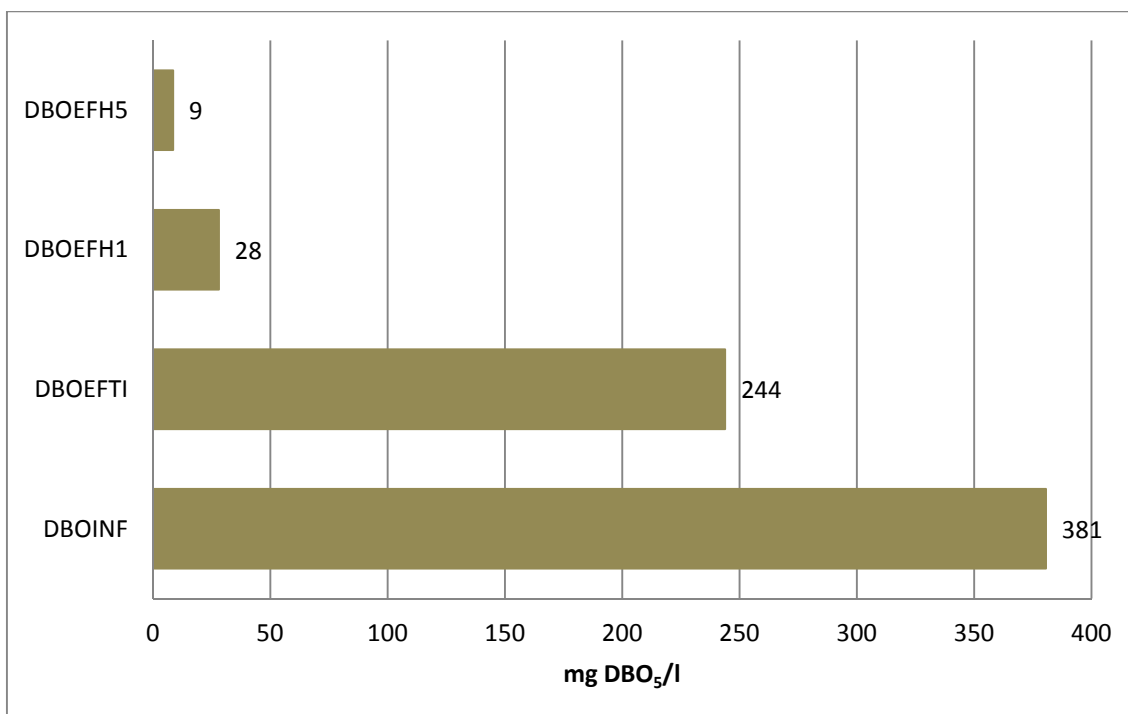


Figura 54. Valores medios de la concentración de DBO₅ a la salida de distintas etapas de HV1+HH5

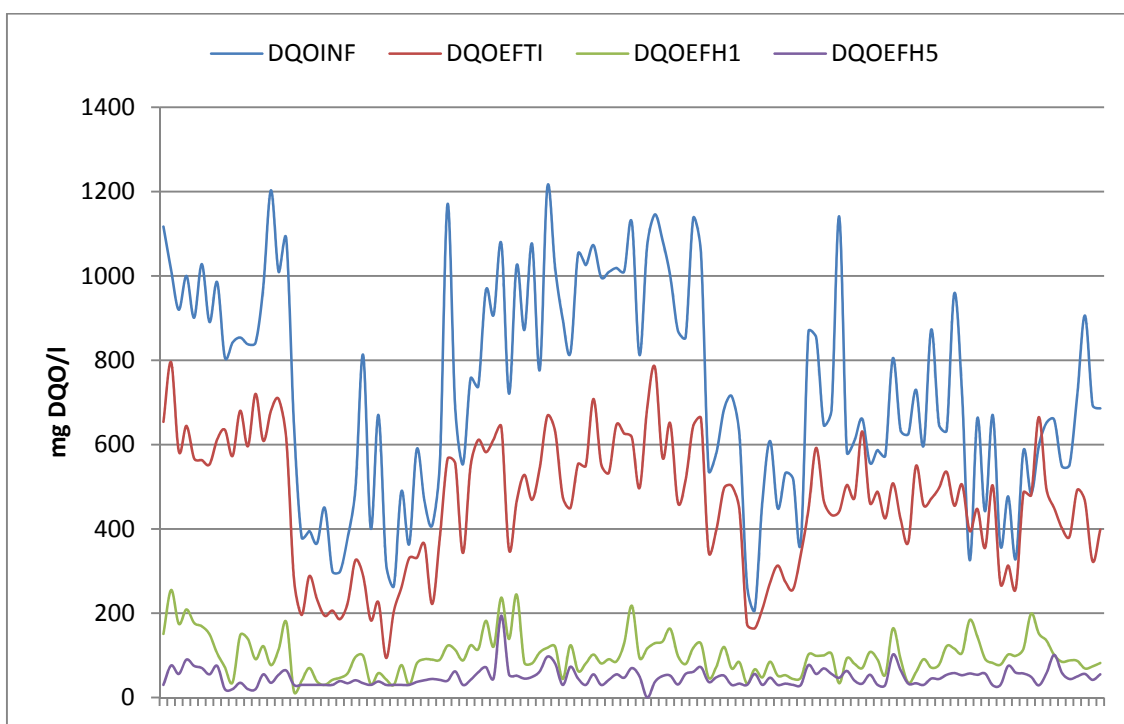


Figura 55. Evolución de la DQO a lo largo del estudio en distintas etapas de HV1+HH5

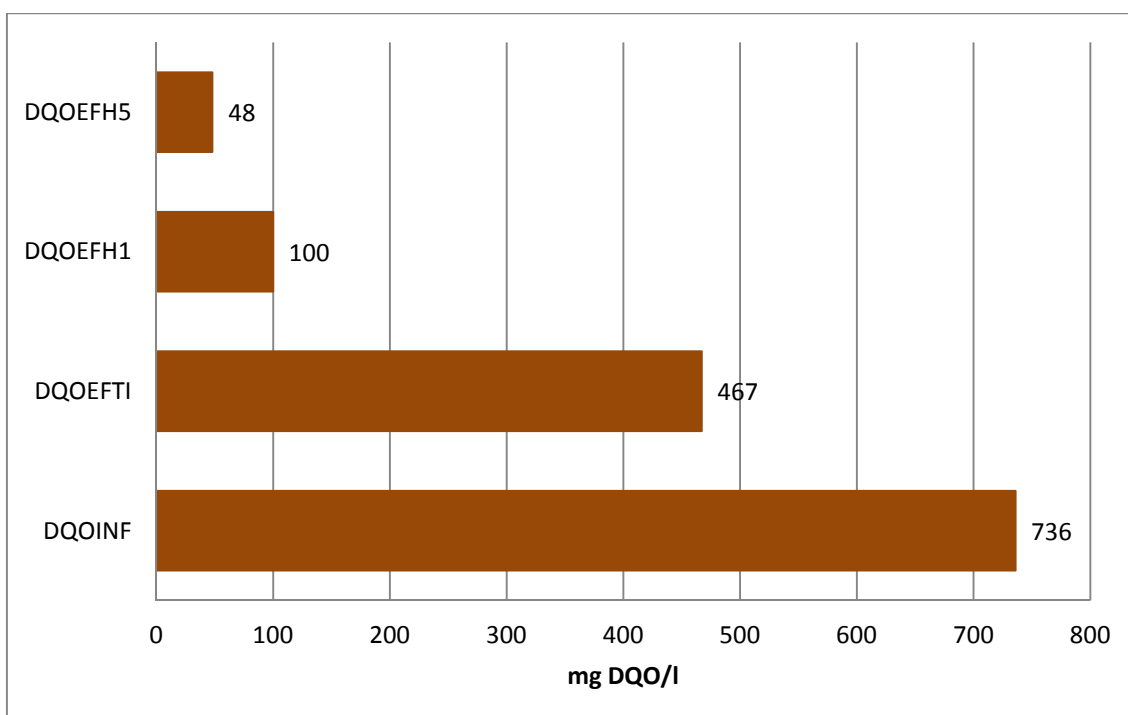


Figura 56. Valores medios de la concentración de DQO a la salida de distintas etapas de HV1+HH5

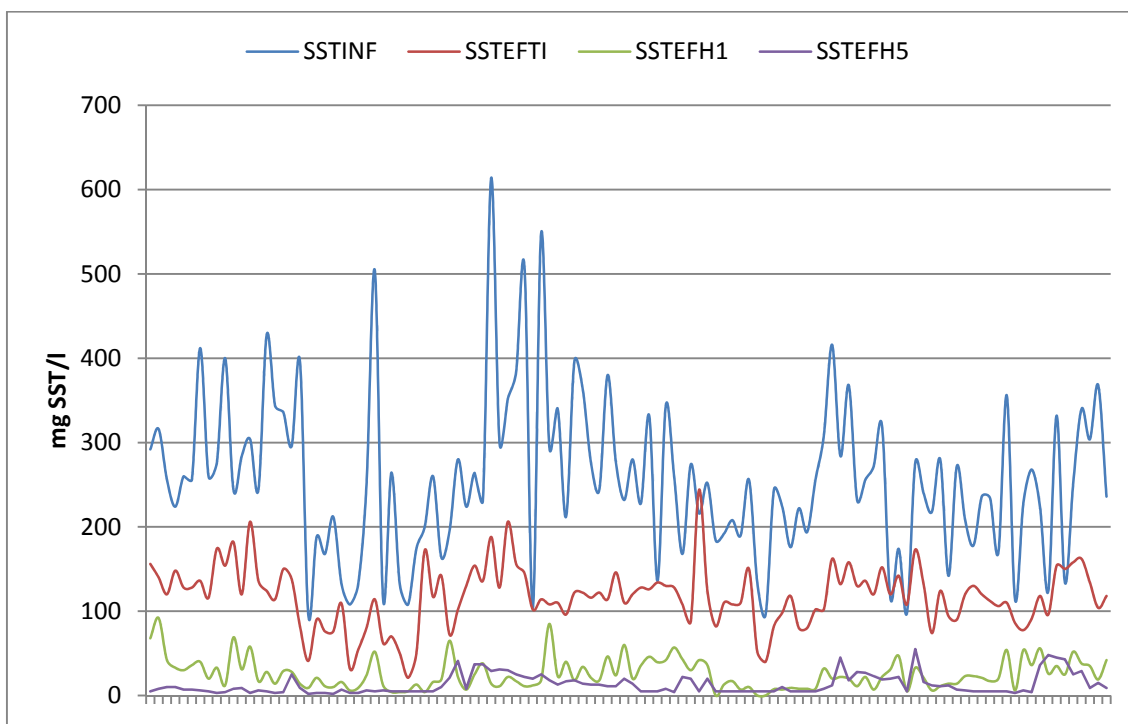


Figura 57. Evolución de los SST a lo largo del estudio en distintas etapas de HV1+HH5

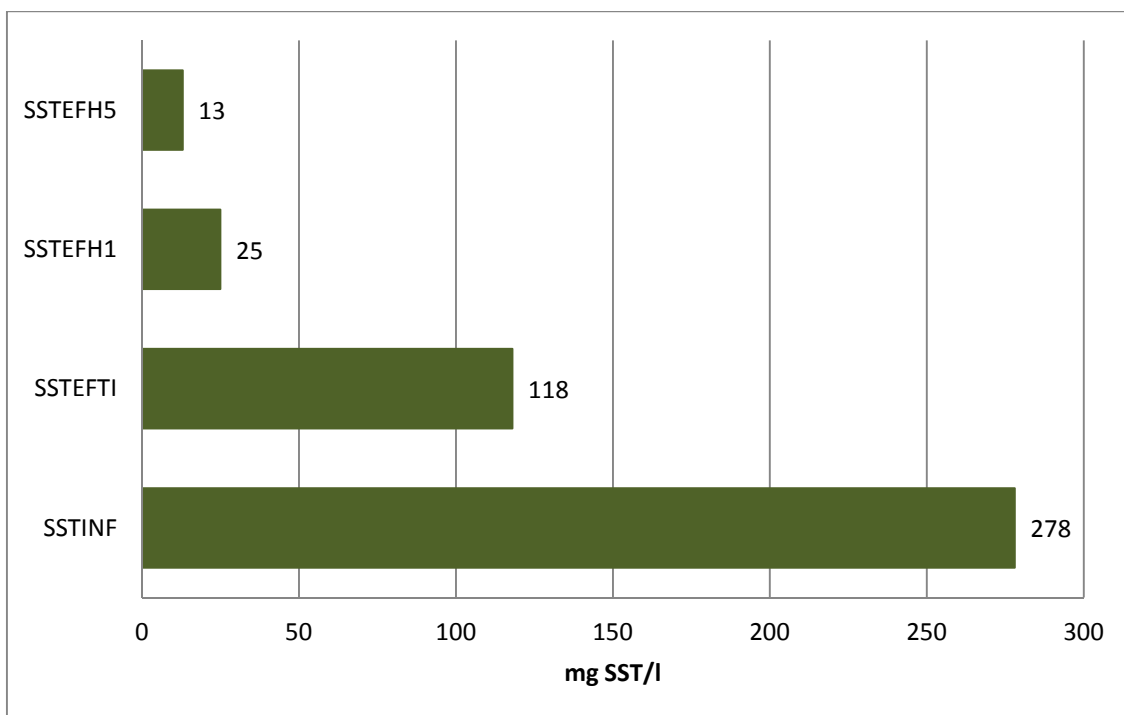


Figura 58. Valores medios de la concentración de SST a la salida de distintas etapas de HV1+HH5

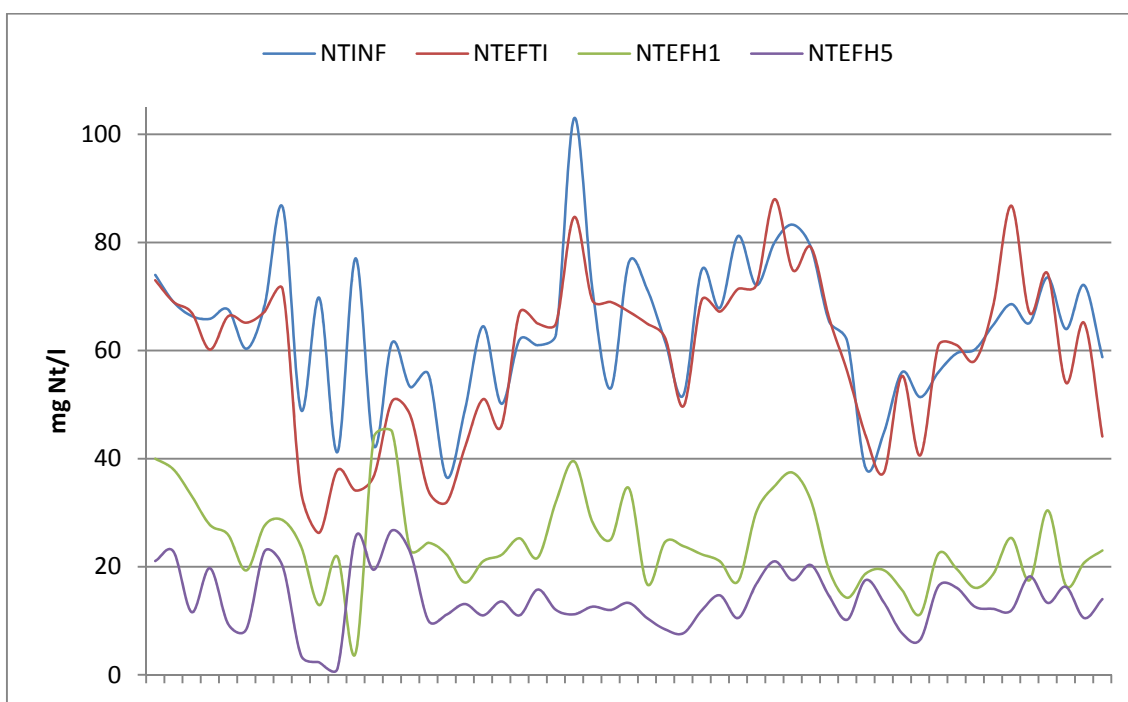


Figura 59. Evolución del Nt a lo largo del estudio en distintas etapas de HV1+HH5

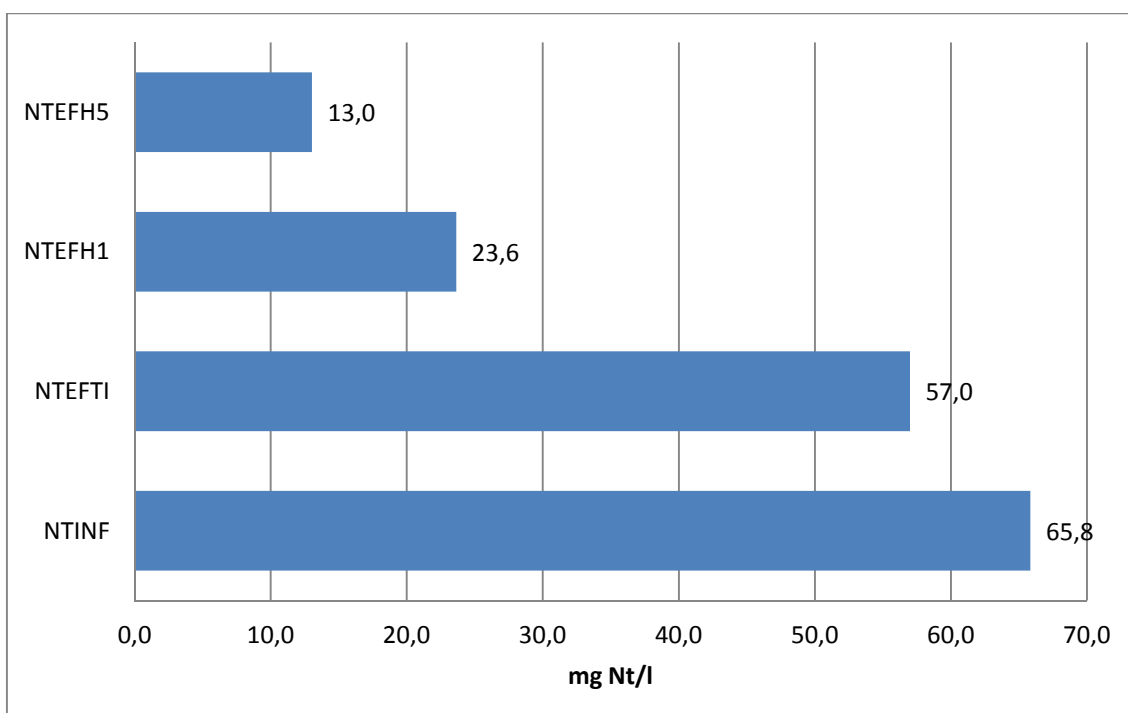


Figura 60. Valores medios de la concentración de Nt a la salida de distintas etapas de HV1+HH5

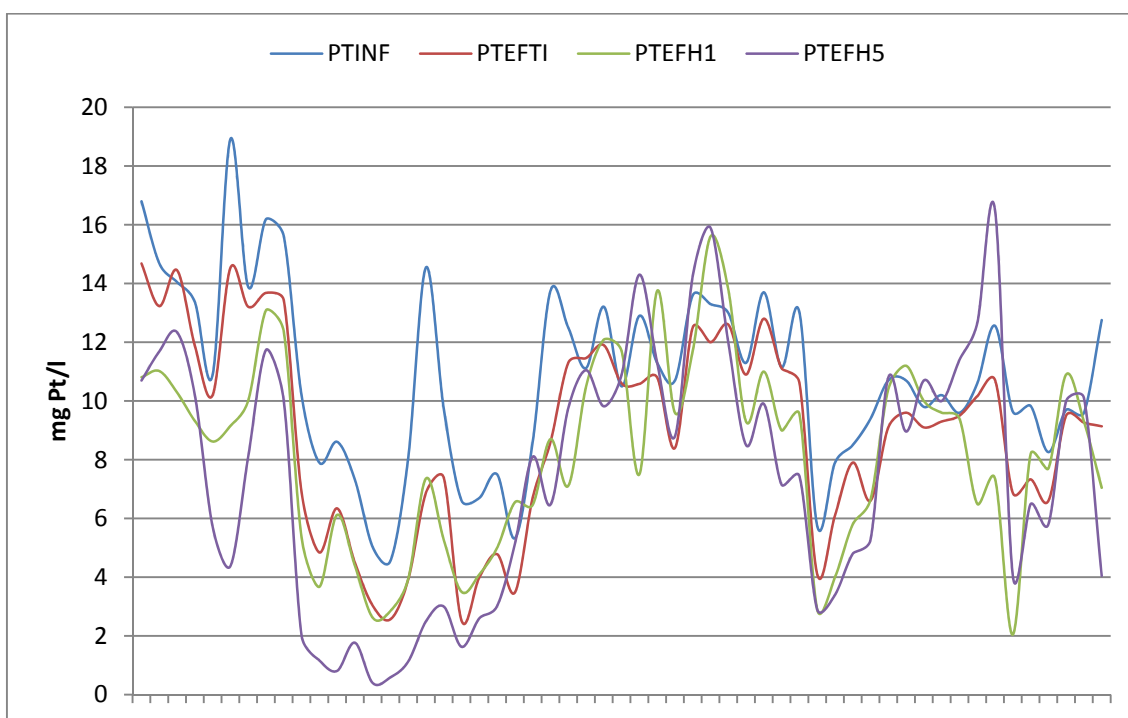


Figura 61. Evolución del Pt a lo largo del estudio en distintas etapas de HV1+HH5

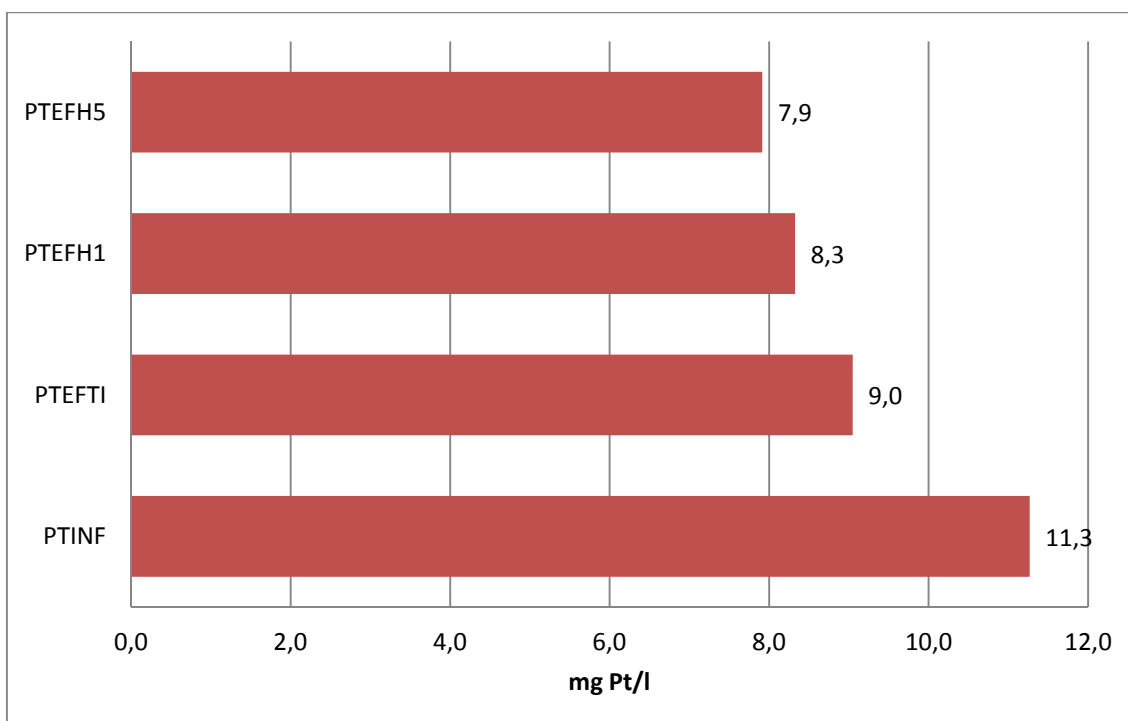


Figura 62. Valores medios de la concentración de Pt a la salida de distintas etapas de HV1+HH5

Finalmente, en la Figura 63 se ha representado la evolución de la relación DBO_5/DQO en el agua residual influente y en los efluentes de las distintas etapas de la combinación HV1+HH5. Se observa, que el mayor porcentaje de reducción de DBO_5 tiene lugar en el HV1 y en menor medida en el HH5. Los valores que se obtienen a cuanto a biodegradabilidad son los habituales citados en la bibliografía (Kadlec, 2009).

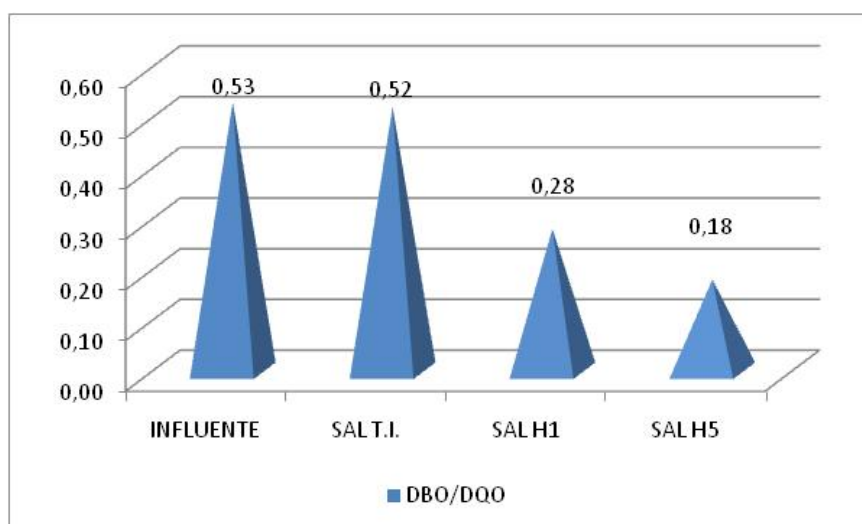


Figura 63. Relación DBO_5/DQO en las distintas etapas de la combinación HV1+HH5

3.3.1.4 Cumplimiento de la normativa de vertidos

Por lo que respecta a los valores absolutos de concentración, la Directiva 91/271/CEE se cumple tanto en lo referente a la DQO (48 mg/l), como a los SST (13 mg/l) y a la DBO_5 (< 13 mg/l). Igualmente en esta combinación se cumple con los porcentajes de reducción exigidos.

Tabla 62. Comparativa con los parámetros de vertido de la combinación HV1+HH5

Parámetros	Valores legales		Valores obtenidos	
	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción	Concentración	Porcentaje medio de reducción
DBO_5	25 mg/l	70-90 %	< 13 mg/l	98 %
DQO	125 mg/l	75 %	48 mg/l	93 %
SST	35 mg/l	90 %	13 mg/l	95 %

En cuanto a los parámetros de vertido referentes a eliminación de nutrientes, en el caso del nitrógeno se estaría de acuerdo a la legislación vigente para vertidos de aglomeraciones mayores de 2.000 h.e. en zonas sensibles. No sucede así para el fósforo.

Tabla 63. Comparativa con los parámetros de vertido de la combinación HV1+HH5

Parámetros	Valores legales		Valores obtenidos	
	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción	Concentración	Porcentaje medio de reducción
Nt	10-15 mg/l	70-80 %	13 mg/l	78 %
Pt	1-2 mg/l	80 %	8 mg/l	31 %

En resumen, se puede decir que la combinación HV1+HH5 ha depurado conforme a los parámetros legales para zonas calificadas como *normales* y como *sensibles* en el caso del nitrógeno.

Al igual que en los humedales estudiados anteriormente, en las figuras que se muestran a continuación se representan los distintos valores (para DBO₅, DQO, SST y Nt) que se encuentran por debajo y por encima de los límites permitidos.

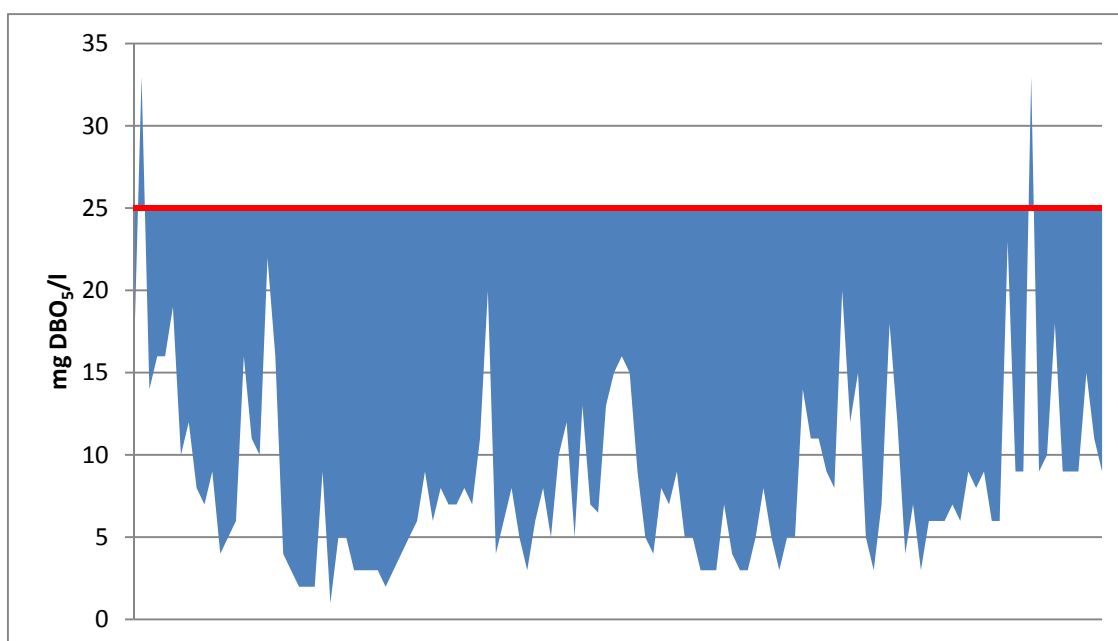


Figura 64. Valores de concentración de DBO₅ a lo largo del estudio en la salida del HV1+HH5

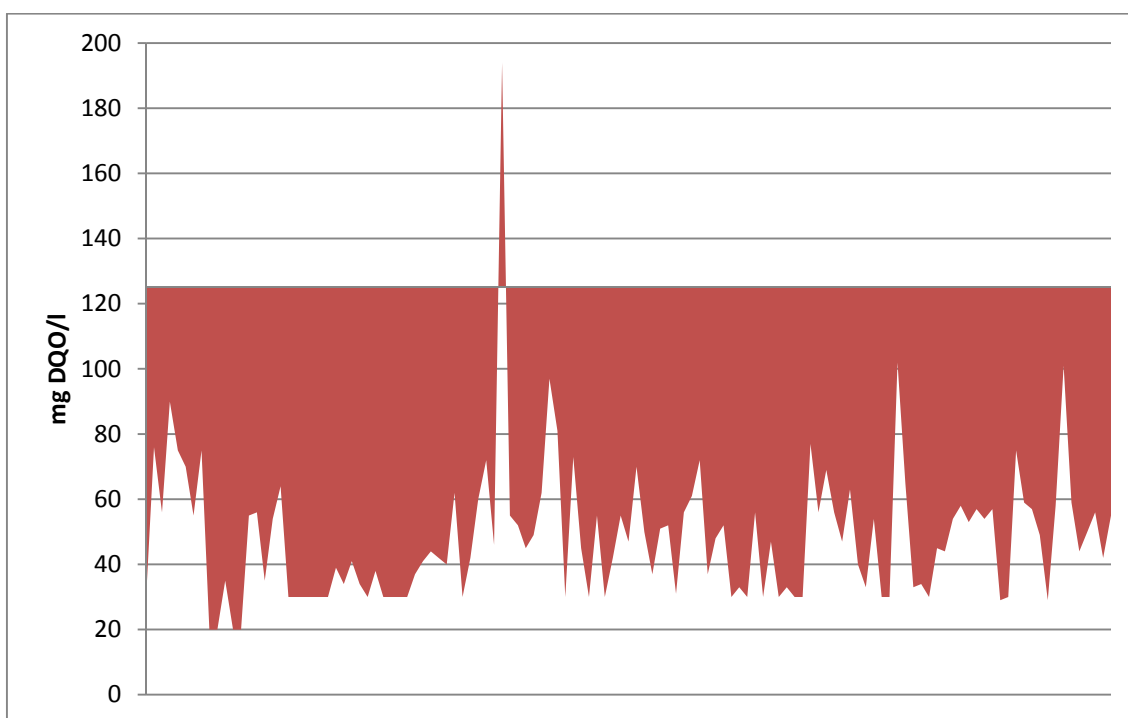


Figura 65. Valores de concentración de DQO a lo largo del estudio en la salida del HV1+HH5

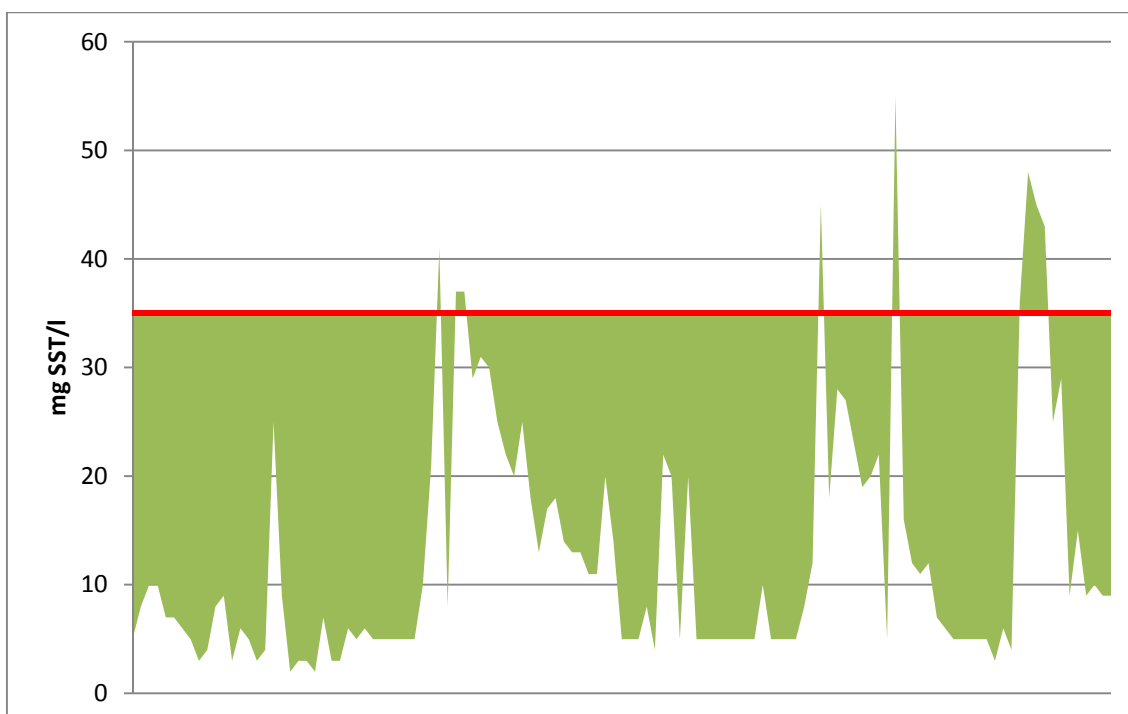


Figura 66. Valores de concentración de SST a lo largo del estudio en la salida del HV1+HH5

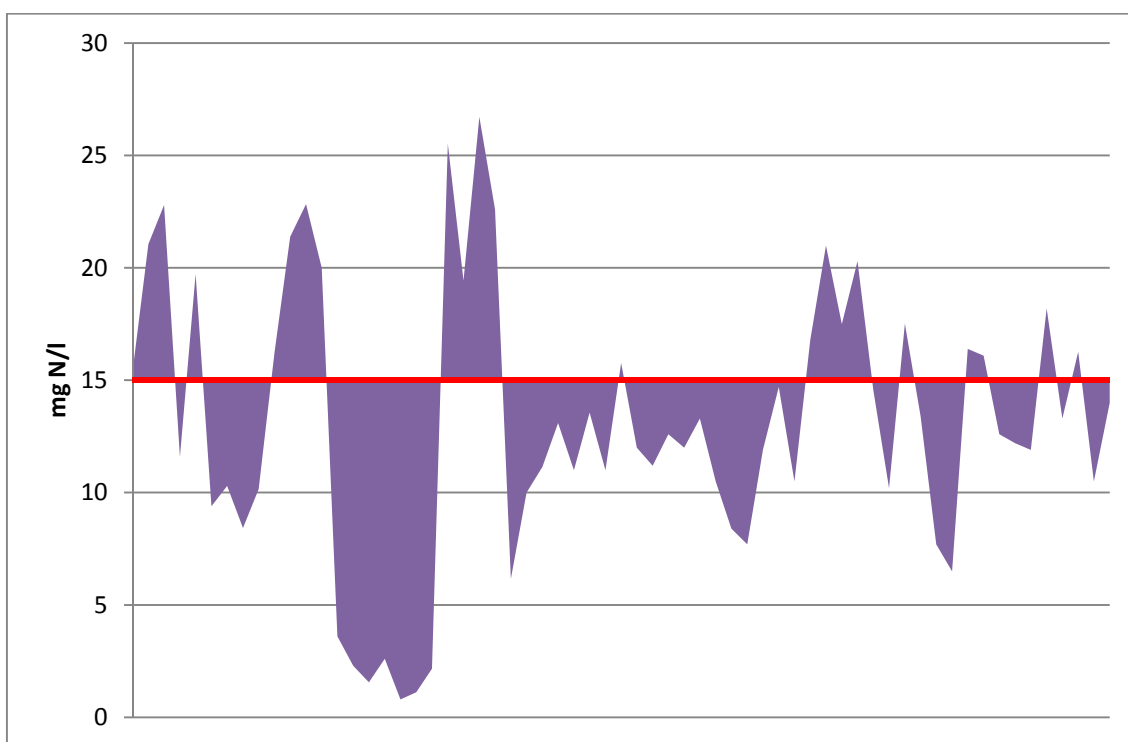


Figura 67. Valores de concentración de Nt a lo largo del estudio en la salida del HV1+HH5

En la Tabla 64 se resumen los porcentajes de valores que en la investigación ha estado por debajo de los límites legales de vertido.

Tabla 64. Porcentajes de valores dentro de los límites de vertido en el estudio del HV1+HH5

	DBO ₅	DQO	SST	Nt
Porcentaje (%)	98	99	92	65

Estos valores tan altos de cumplimiento en la eliminación de contaminantes muestran la alta eficiencia del sistema a lo largo del estudio.

3.3.2 Combinación HH2 + HH6

Tal combinación se esquematiza en la Ilustración 86 (página 207).

3.3.2.1 Condiciones operativas

El humedal de cabecera de esta combinación (HH2) se alimenta con agua residual procedente del tanque Imhoff. Los parámetros operacionales del HH2 se mostraron anteriormente (Tabla 45 y Tabla 46, pag. 245) y las condiciones operativas del HH6 se exponen a continuación (Tabla 65 y Tabla 66).

Tabla 65. Valores operacionales del HH6

	Carga orgánica superficial (g DBO ₅ /m ² *d)	Carga de sólidos superficial (g SST/m ² *d)	Carga de nitrógeno superficial (g Nt/m ² *d)	Carga de fósforo superficial (g Pt/m ² *d)
VALOR MEDIO	2,0	0,6	2,0	0,4
DESV. STANDAR	1,3	0,4	0,6	0,1
VALOR MÁXIMO	6,4	2,9	3,3	0,7
VALOR MÍNIMO	0,0	0,2	0,3	0,1
Nº DE VALORES	121	124	56	66
Valores bibliográficos	6,2	5,4	2,4	0,6

Tabla 66. Valores operacionales del HH6 (continuación)

	Caudal (m ³ /d)	Carga hidráulica (m ³ /m ² *d)
VALOR MEDIO	9,9	0,047
DESV. STANDAR	2,0	0,010
VALOR MÁXIMO	17,0	0,080
VALOR MÍNIMO	5,9	0,028
Nº DE VALORES	124	124

Dado que el HH6 actúa como tratamiento de afino recibiendo el efluente del HH2, sus condiciones operativas, en lo referente a las cargas de materia orgánica, en suspensión y en menor medida nutrientes, presentan valores inferiores a las que son habituales en este tipo de humedales cuando actúan como tratamiento secundario.

3.3.2.2 Rendimientos de eliminación

En la Tabla 67 y Tabla 68 se muestran los rendimientos de depuración de la combinación HH2+HH6 en cuanto a eliminación de DQO, DBO₅, SST, Nt y Pt. Se toman como valores de entrada los correspondientes a la salida del tanque Imhoff.

Tabla 67. Valores del efluente y rendimiento de la combinación HH2+HH6

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	69	84	21	94	< 10	94
DESV. TÍPICA	30	8	14	6	5	6
VALOR MÁXIMO	170	95	70	100	33	100
VALOR MÍNIMO	< 30	56	< 13	62	< 10	62
Nº DE VALORES	122	122	111	111	121	121

Tabla 68. Valores del efluente y rendimiento de la combinación HH2+HH6 (continuación)

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	36,1	40	7,9	14
DESV. TÍPICA	11,1	19	2,8	34
VALOR MÁXIMO	59,0	81	14,6	82
VALOR MÍNIMO	9,2	-3	1,3	-81
Nº DE VALORES	58	46	70	56

El comportamiento del HH6 como unidad individualizada, en cuanto a eliminación de DQO, DBO₅, SST, Nt y Pt, se analiza en la Tabla 69 y Tabla 70, en las que los porcentajes de reducción se calculan en base a los valores del efluente del HH2.

Tabla 69. Valores del efluente y rendimiento del HH6

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	69	40	21	45	< 10	45
DESV. TÍPICA	30	18	14	40	5	50
VALOR MÁXIMO	170	82	70	94	33	100
VALOR MÍNIMO	< 30	-22	< 13	-23	< 10	-24
Nº DE VALORES	122	122	111	105	121	121

Tabla 70. Valores del efluente y rendimiento del HH6 (continuación)

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	36,1	25	7,8	8
DESV. TÍPICA	11,1	17	2,8	38
VALOR MÁXIMO	59,0	65	14,6	89
VALOR MÍNIMO	9,2	-17	1,3	-26
Nº DE VALORES	58	46	69	54

La Figura 68 muestra la carga orgánica superficial de entrada frente a la eliminada. El valor de la pendiente, y por tanto el porcentaje de reducción obtenido en cuanto a eliminación de materia orgánica es del 59%. Rendimiento relativamente bajo si lo comparamos con el HH5. Según la bibliografía más reciente (Faulwetter, 2009), la profundidad del lecho es uno de los factores que afectan a la eliminación de contaminantes en sistemas horizontales. Humedales someros (nivel de agua entre 0,20-0,35 m.) presentan condiciones más oxidadas que los lecho comúnmente utilizados (nivel de agua entre 0,5-0,7 m.), lo que permite una mayor eficiencia de eliminación de contaminantes (García, 2004, 2005; Matamoros, 2005). En nuestro caso recordar que el HH5 tiene un espesor de 0,40 m y el HH6 de 0,60 m.

El rendimiento alcanzado respecto a eliminación de SST es 76% (Figura 69), en lo referente al nitrógeno, es del 24% (Figura 70). El rendimiento en nitrógeno es bastante más inferior que el alcanzado en el HH5, esto es debido a que al tratarse de dos Humedales Horizontales en serie (HH2+HH5) no ha habido fenómenos de nitrificación y por tanto la desnitrificación es menor.

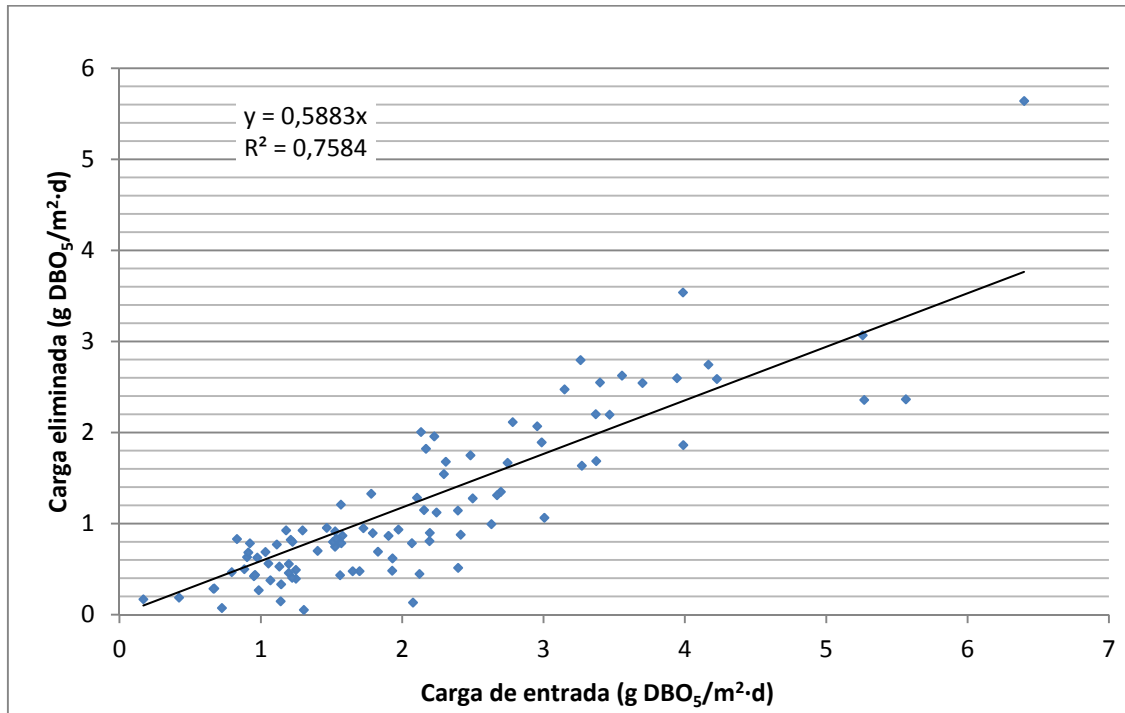


Figura 68. Carga orgánica eliminada frente a carga de entrada en el HH6

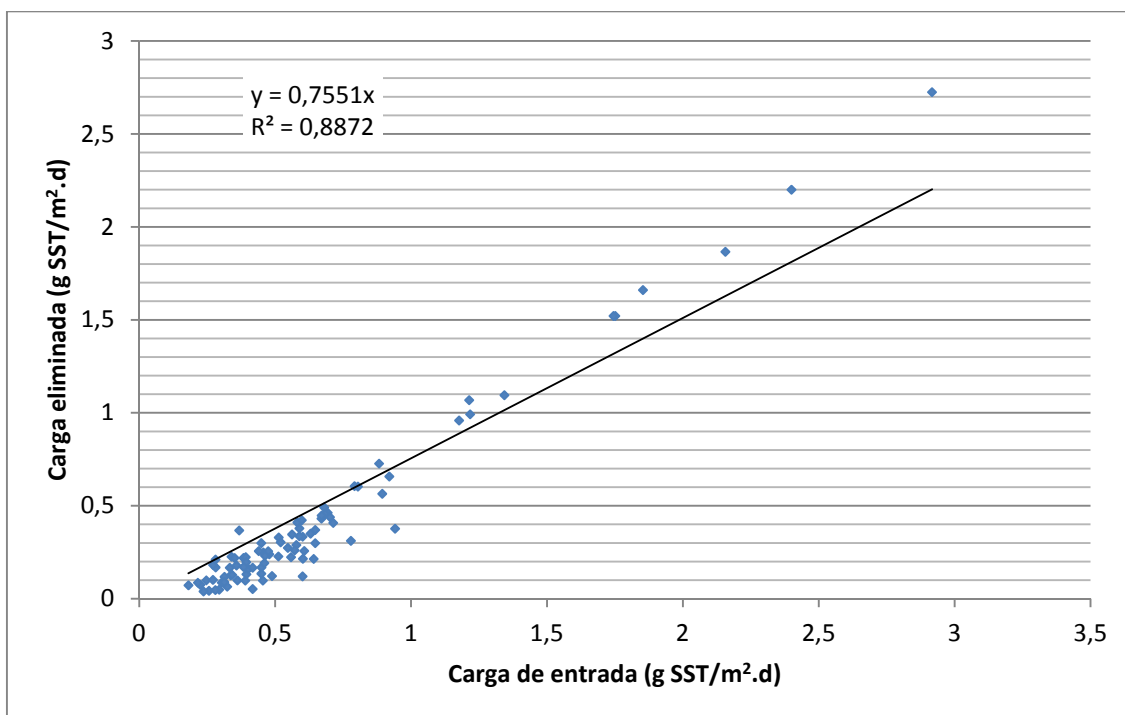


Figura 69. Carga eliminada de SST frente a carga de entrada en el HH6

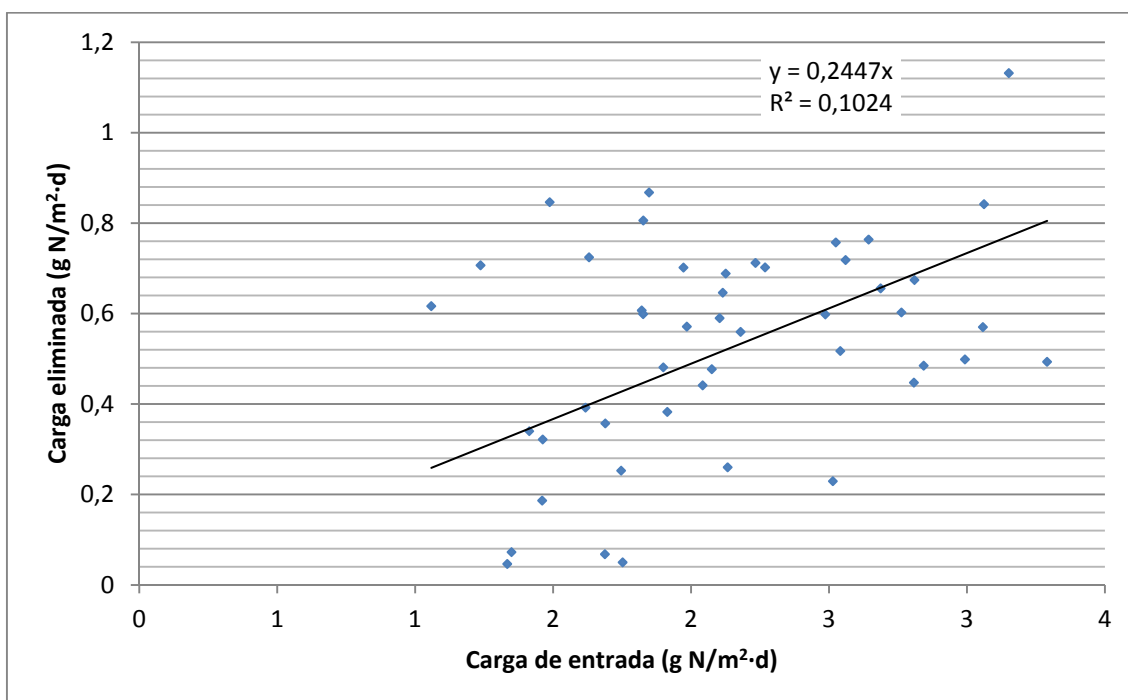


Figura 70. Carga eliminada de Nt frente a carga de entrada en el HH6

3.3.2.3 Rendimientos de depuración globales

Para evaluar los rendimientos globales de depuración se consideran los porcentajes tomando como valores del influente los de entrada al tanque Imhoff y los del efluente de la combinación HH2+HH6 (Tabla 71 y Tabla 72).

Tabla 71. Valores globales obtenidos en la combinación HH2+HH6

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	69	90	21	94	< 10	97
DESV. TÍPICA	30	6	14	6	5	3
VALOR MÁXIMO	170	97	70	100	33	100
VALOR MÍNIMO	< 30	65	< 13	62	< 10	75
Nº DE VALORES	122	121	111	111	121	121

Tabla 72. Valores globales obtenidos en la combinación HH2+HH6 (continuación)

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	36,1	44	7,9	30
DESV. TÍPICA	11,1	17	2,8	24
VALOR MÁXIMO	59,0	81	14,6	87
VALOR MÍNIMO	9,2	7	1,3	-29
Nº DE VALORES	58	56	70	66

Para un estudio más detallado del comportamiento de la combinación HH2+HH6 se representa a continuación la evolución de los parámetros analizado a lo largo del estudio en sus distintas etapas.

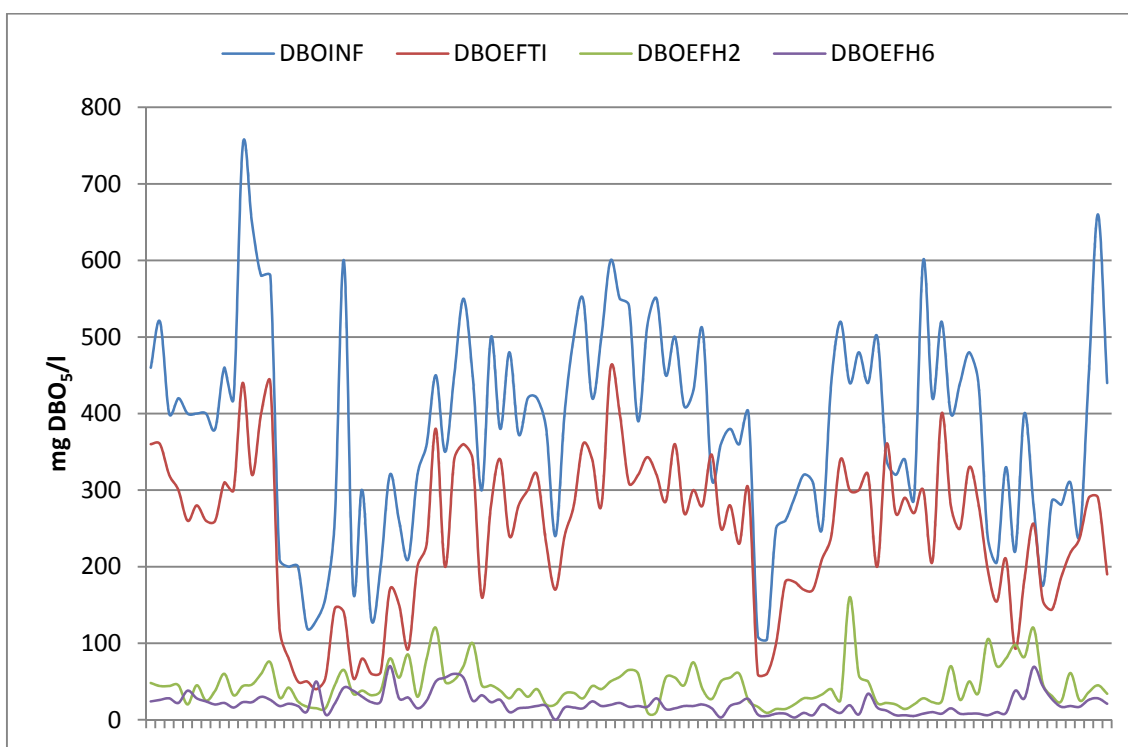


Figura 71. Evolución de la DBO₅ a lo largo del estudio en distintas etapas de HH2+HH6

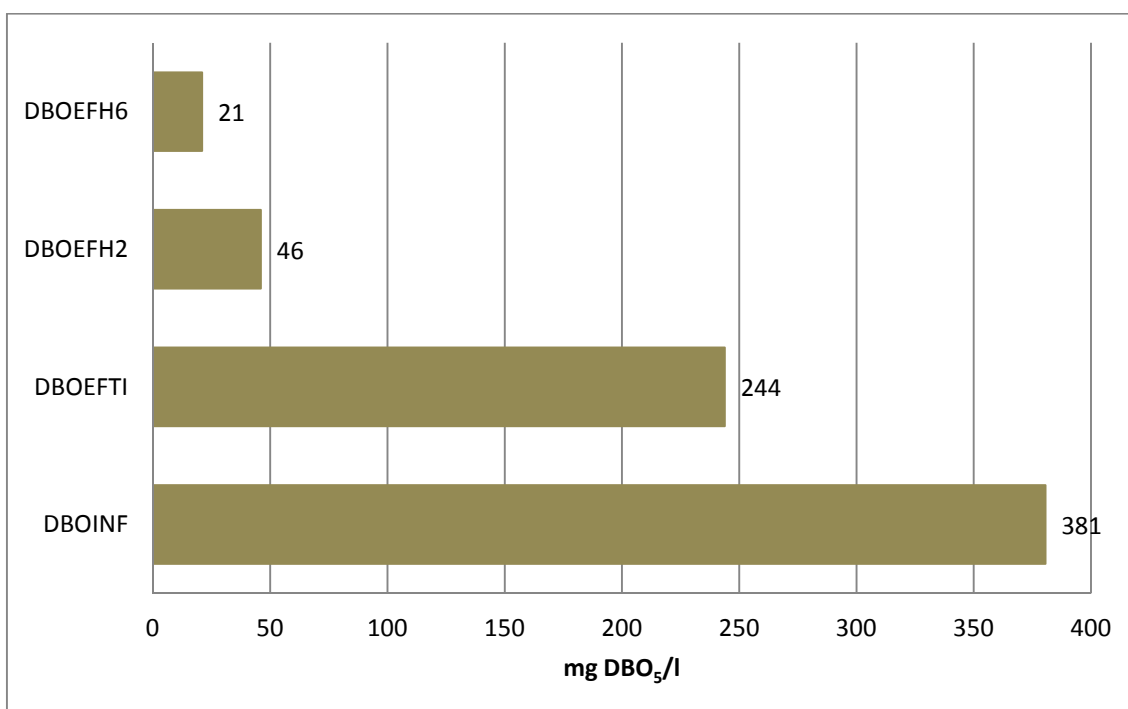


Figura 72. Valores medios de la concentración de DBO_5 a la salida de distintas etapas de HH2+HH6

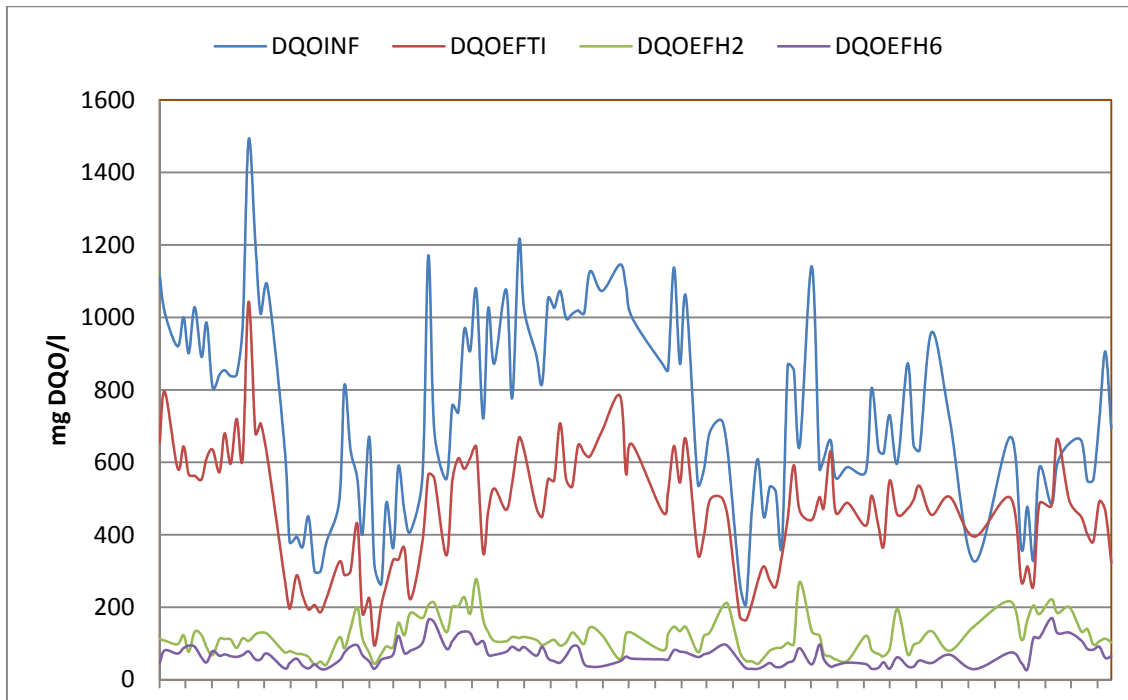


Figura 73. Evolución de la DQO a lo largo del estudio en distintas etapas de HH2+HH6

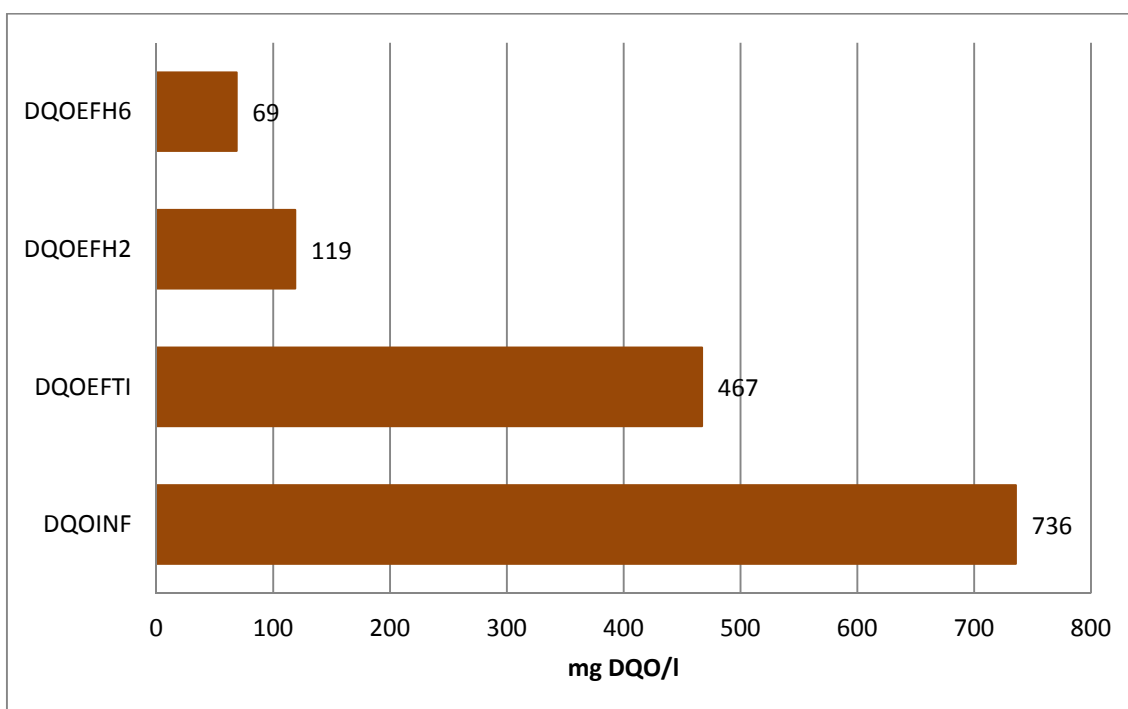


Figura 74. Valores medios de la concentración de DQO a la salida de distintas etapas de HH2+HH6

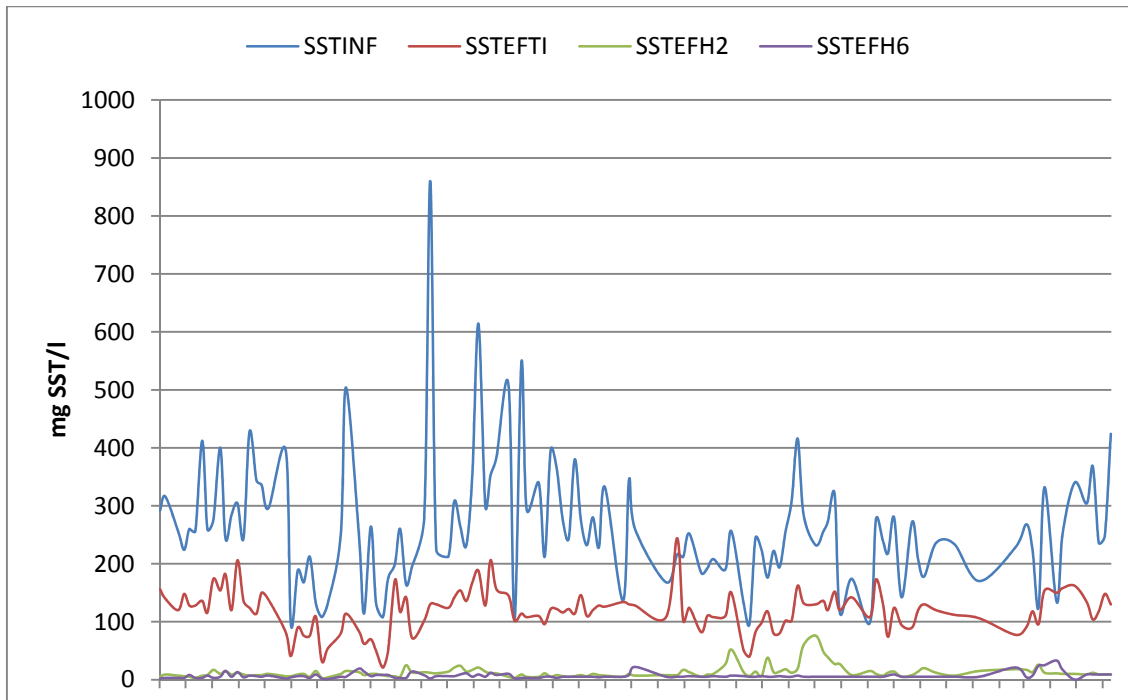


Figura 75. Evolución de los SST a lo largo del estudio en distintas etapas de HH2+HH6

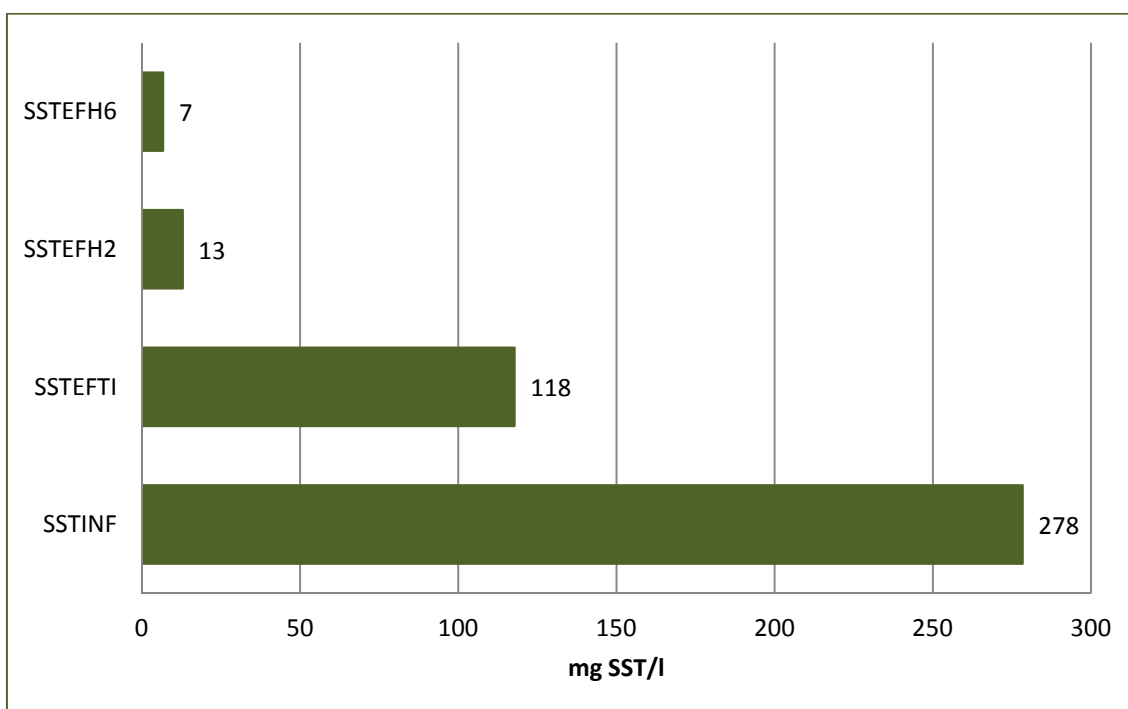


Figura 76. Valores medios de la concentración de SST a la salida de distintas etapas de HH2+HH6

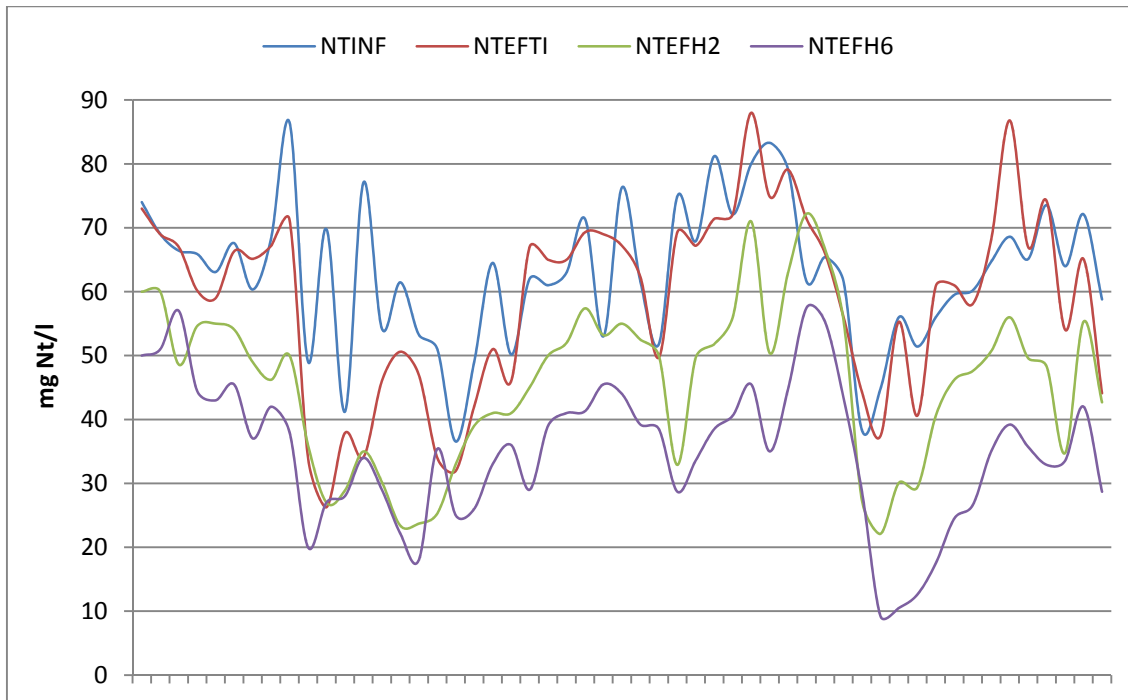


Figura 77. Evolución del Nt a lo largo del estudio en distintas etapas de HH2+HH6

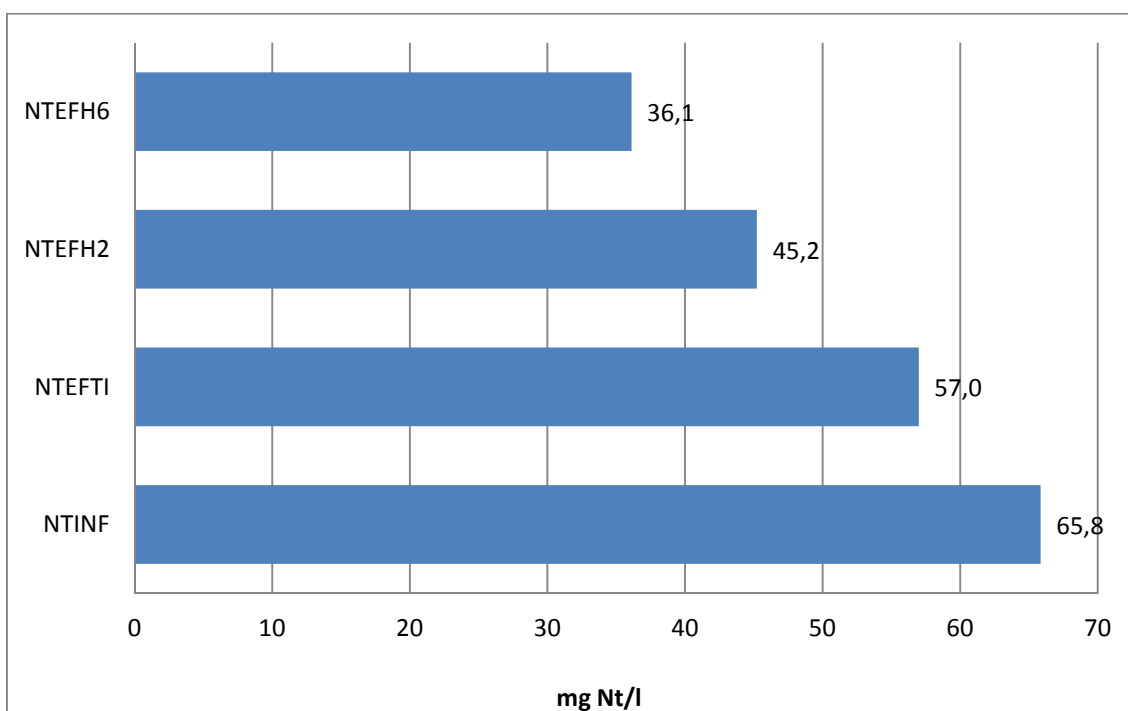


Figura 78. Valores medios de la concentración de Nt a la salida de distintas etapas de HH2+HH6

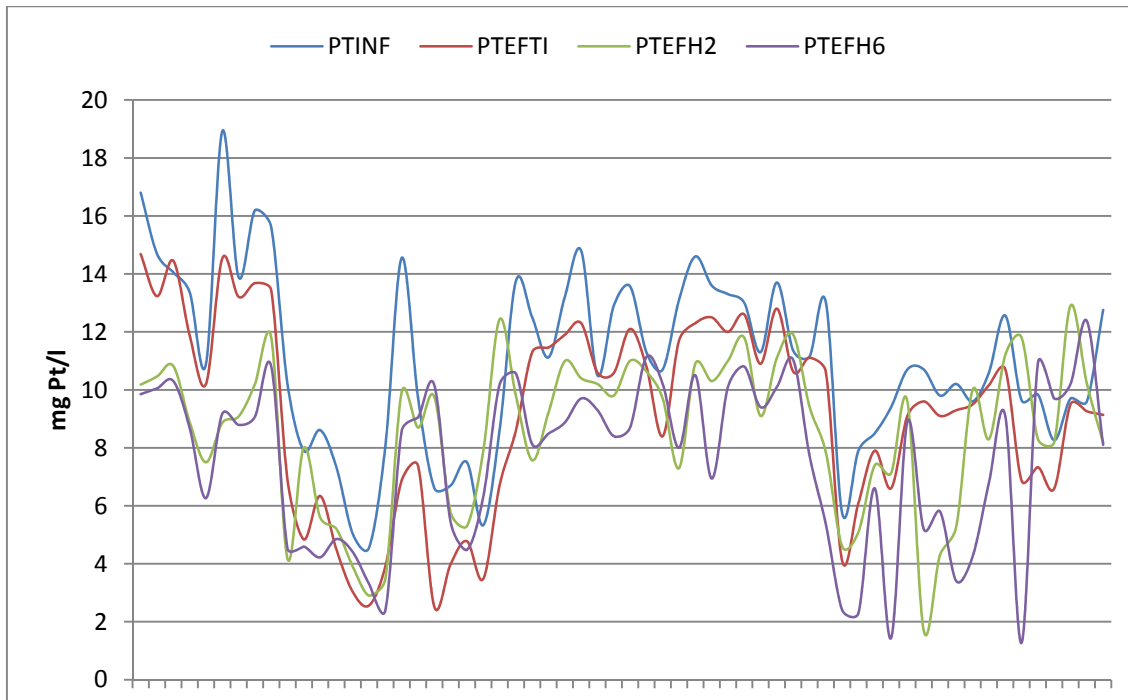


Figura 79. Evolución del Pt a lo largo del estudio en distintas etapas de HH2+HH6

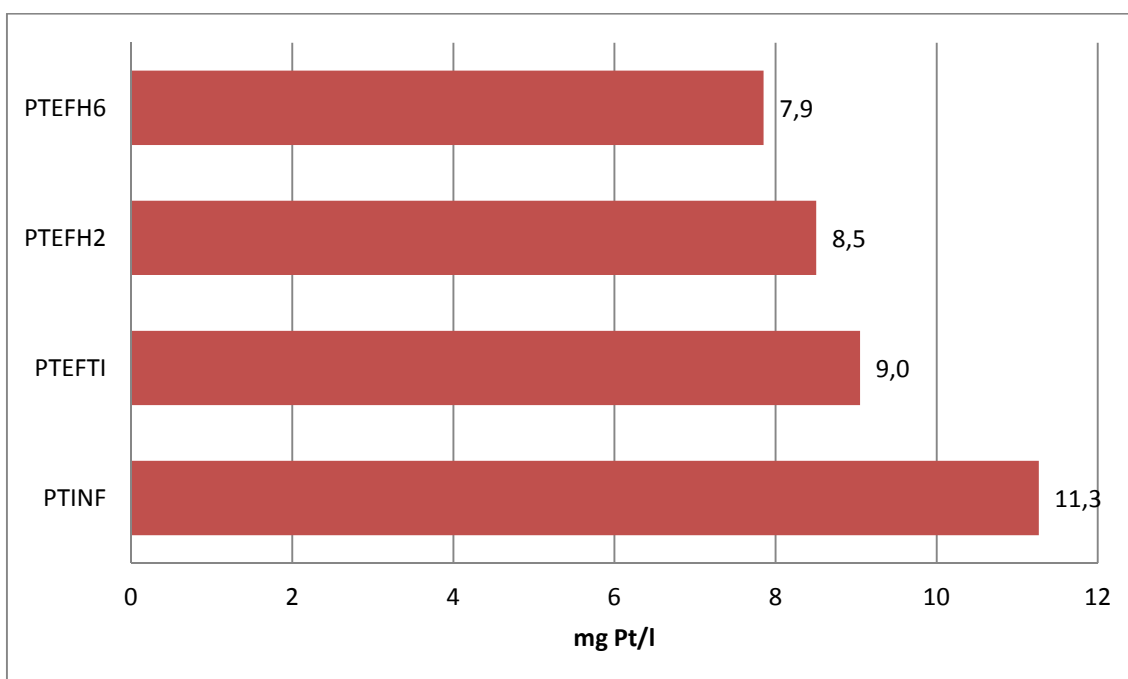


Figura 80. Valores medios de la concentración de Pt a la salida de distintas etapas de HH2+HH6

Finalmente, en la Figura 81, se ha representado la evolución de la relación DBO_5/DQO en el agua residual influente y en los efluentes de las distintas etapas de la combinación HH2HH6. Se observa, que el mayor porcentaje de reducción de materia orgánica tiene lugar en el HH2 y en menor medida en el HH6.

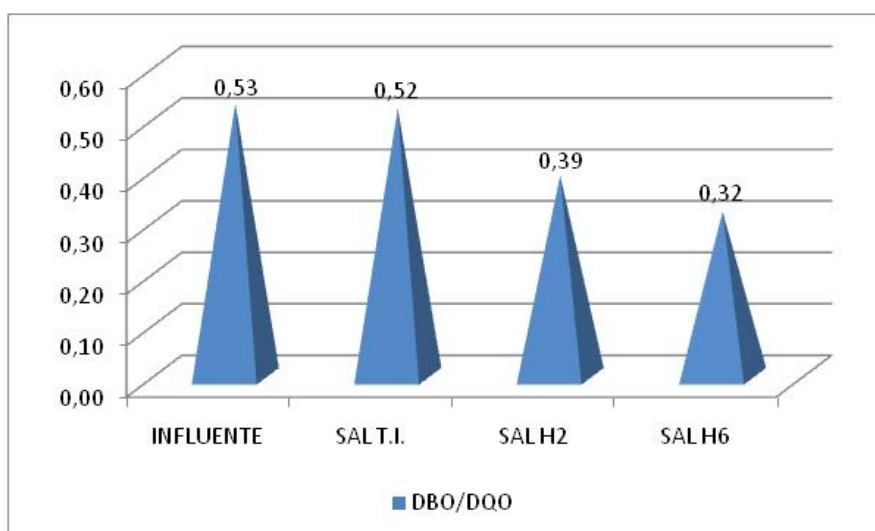


Figura 81. Relación DBO_5/DQO en distintos puntos

3.3.2.4 Cumplimiento de la normativa de vertidos

Por lo que respecta a los valores absolutos de concentración, la Directiva 91/271/CEE se cumple tanto en lo referente a la DQO (69 mg/l), como a los SST (< 10 mg/l) y a la DBO₅ (21 mg/l). Igualmente en esta combinación se cumple con los porcentajes de reducción exigidos.

Tabla 73. Comparativa con los parámetros de vertido de la combinación HH2+HH6

Parámetros	Valores legales		Valores obtenidos	
	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción	Concentración	Porcentaje medio de reducción
DBO ₅	25 mg/l	70-90 %	21 mg/l	94 %
DQO	125 mg/l	75 %	69 mg/l	90 %
SST	35 mg/l	90 %	< 10 mg/l	97 %

En cuanto a los parámetros de vertido referentes a eliminación de nutrientes, ni en el caso del nitrógeno ni del fósforo se estaría de acuerdo a la legislación vigente para vertidos de aglomeraciones mayores de 2.000 h.e. en zonas sensibles.

Tabla 74. Comparativa con los parámetros de vertido de la combinación HH2+HH6

Parámetros	Valores legales		Valores obtenidos	
	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción	Concentración	Porcentaje medio de reducción
Nt	10-15 mg/l	70-80 %	36 mg/l	44 %
Pt	1-2 mg/l	80 %	8 mg/l	30 %

En resumen, se puede decir que la combinación HH2+HH6 ha depurado conforme a los parámetros legales para zonas calificadas como *normales*, no siendo así para las calificadas como *sensibles*.

Al igual que en los humedales estudiados anteriormente, en las figuras que se muestran a continuación se representan los distintos valores (para DBO₅, DQO, SST) que se encuentran por debajo y por encima de los límites permitidos.

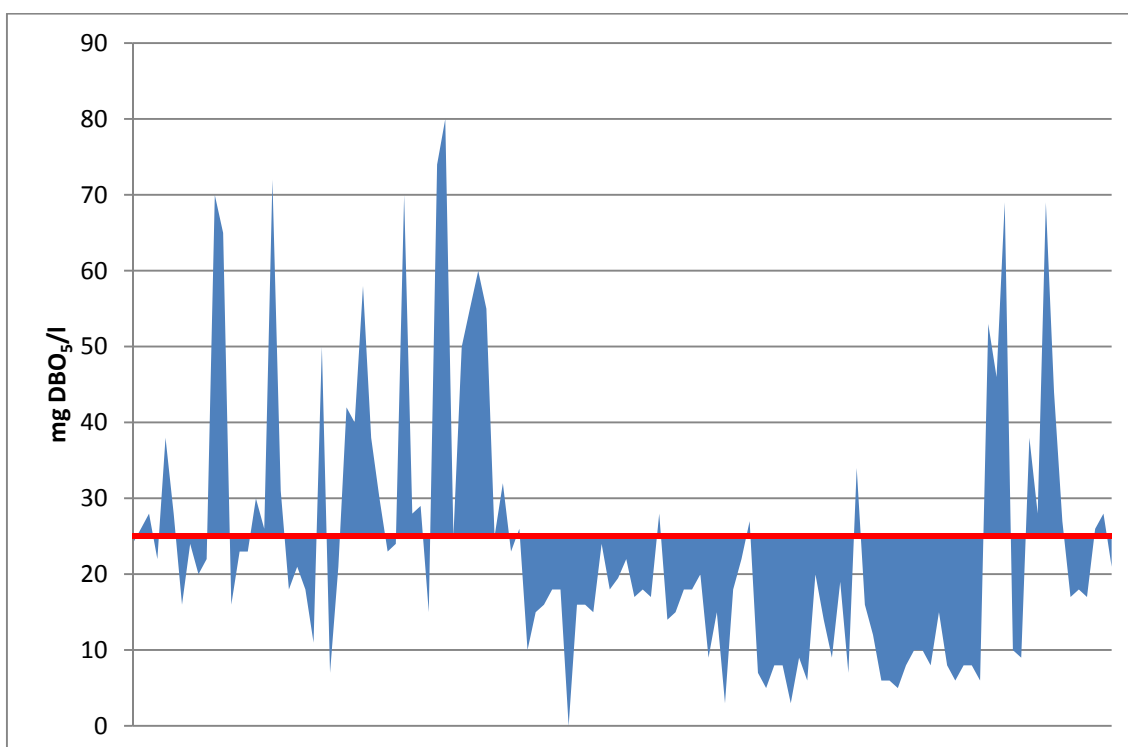


Figura 82. Valores de concentración de DBO₅ a lo largo del estudio en la salida del HH2+HH6

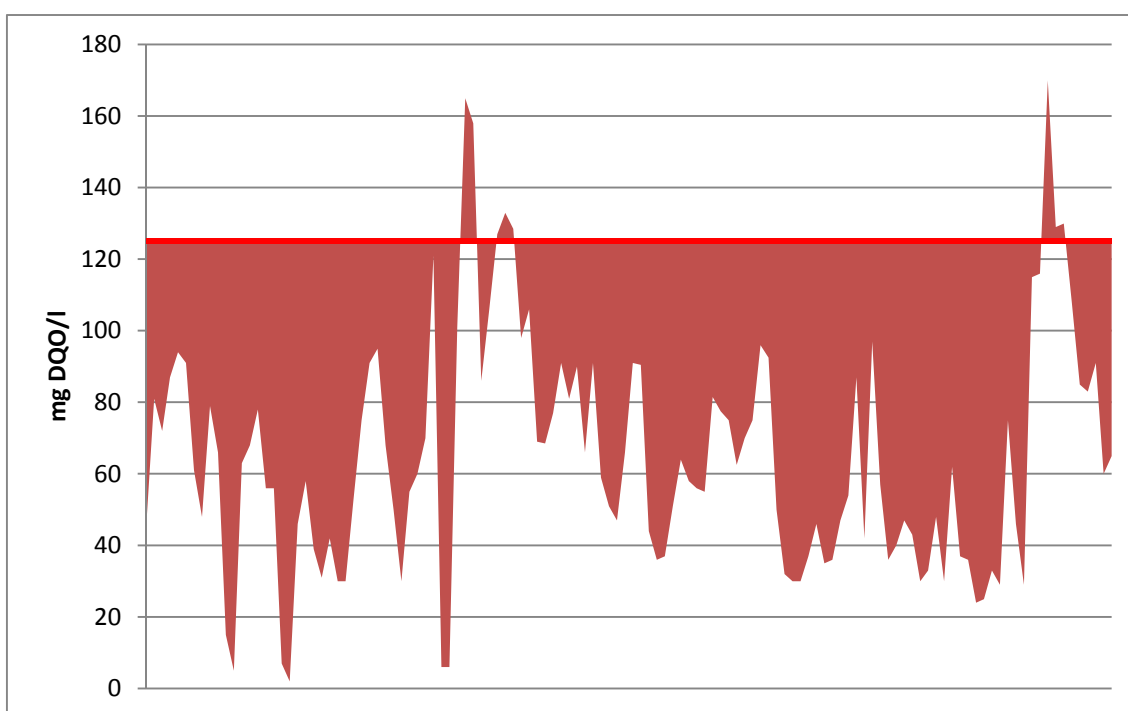


Figura 83. Valores de concentración de DQO a lo largo del estudio en la salida del HH2+HH6

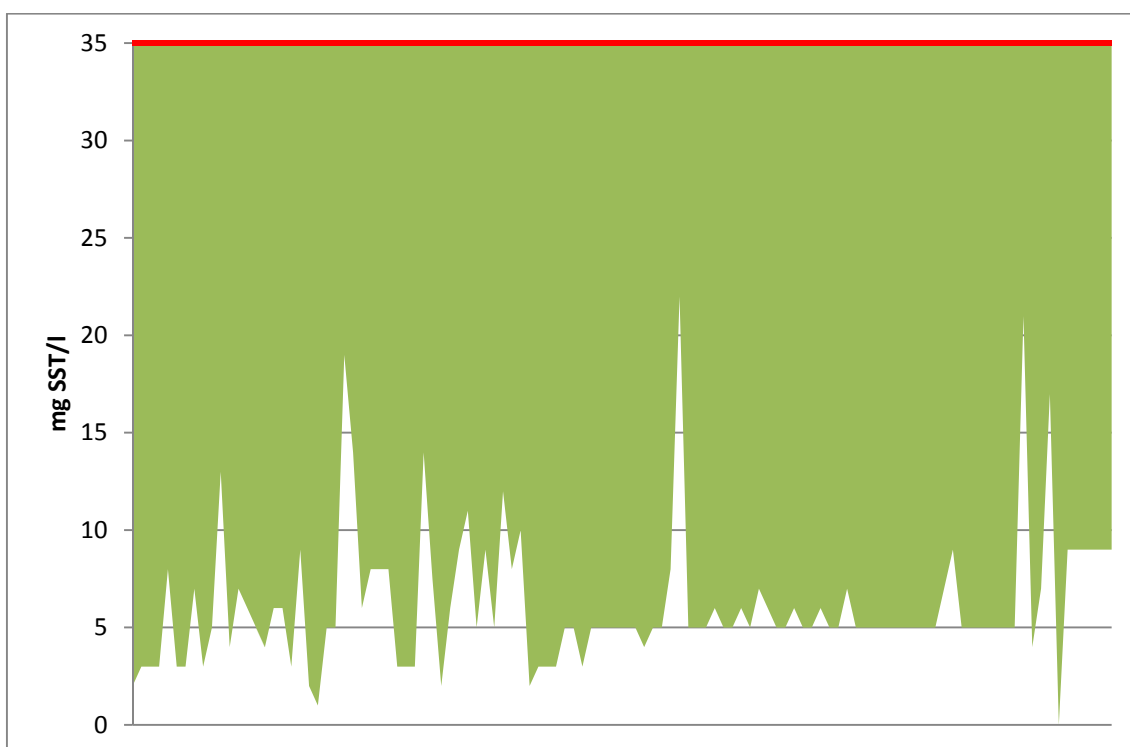


Figura 84. Valores de concentración de SST a lo largo del estudio en la salida del HH2+HH6

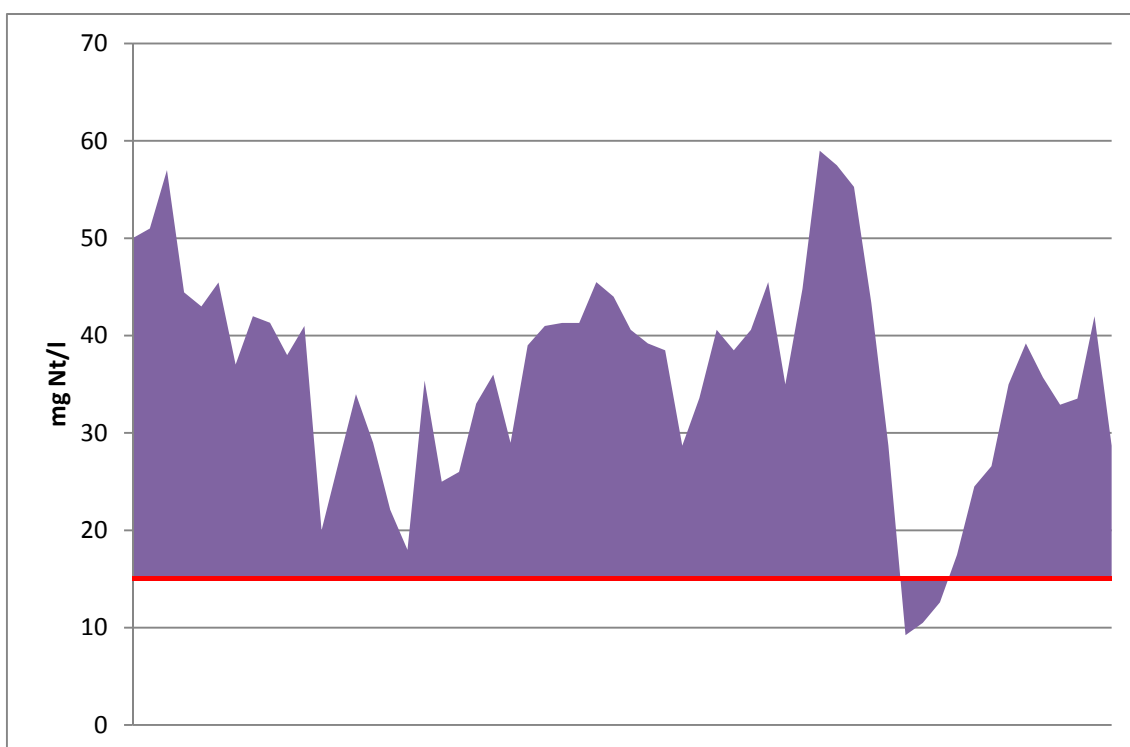


Figura 85. Valores de concentración de Nt a lo largo del estudio en la salida del HH2+HH6

En la Tabla 75 se resumen los porcentajes de valores que en la investigación ha estado por debajo de los límites legales de vertido.

Tabla 75. Porcentajes de valores dentro de los límites de vertido en el estudio del HH2+HH6

	DBO ₅	DQO	SST	Nt
Porcentaje (%)	72	93	100	5

Estos valores tan altos de cumplimiento en la eliminación de materia orgánica y en suspensión muestran la alta eficiencia del sistema a lo largo del estudio. No siendo así en el caso del nitrógeno en el que el porcentaje de cumplimiento es muy escaso, ésto es debido (como ya se ha comentado anteriormente) a que en esta combinación el ambiente en ambas etapas es de anaerobiosis no favoreciéndose por tanto las reacciones de nitrificación y desnitrificación que sí de daban en la combinación HV1+HH5.

3.3.3 Combinación HV3 + H4

3.3.3.1 Condiciones operativas

El humedal de cabecera de esta combinación (HV3) se alimenta con agua residual procedente del tanque Imhoff. Los parámetros operacionales del HV3 se mostraron anteriormente y las condiciones operativas del H4 se exponen a continuación (Tabla 76 y Tabla 77). Señalar que esta combinación ha sido estudiada por menos tiempo ya que hasta enero de 2007 no comenzó a ser alimentado el H4 con agua procedente del HV3.

En cuanto a los valores habituales hay gran disparidad en la bibliografía (Vymazal, 2008). Al tratarse de sistemas que se emplean como afino de otros, no hay uniformidad en los criterios para los valores operacionales.

Tabla 76. Valores operacionales del H4

	Carga orgánica superficial (g DBO ₅ /m ² *d)	Carga de sólidos superficial (g SST/m ² *d)	Carga de nitrógeno superficial (g N/m ² *d)	Carga de fósforo superficial (g P/m ² *d)
VALOR MEDIO	1,3	1,5	1,4	0,4
DESV. STANDAR	0,8	1,5	0,5	0,1
VALOR MÁXIMO	3,7	10,9	2,6	0,8
VALOR MÍNIMO	0,2	0,1	0,2	0,0
Nº DE VALORES	84	96	43	48

Tabla 77. Valores operacionales del H4 (continuación)

	Caudal (m ³ /d)	Carga hidráulica (m ³ /m ² *d)
VALOR MEDIO	13,3	0,056
DESV. STANDAR	2,2	0,009
VALOR MÁXIMO	21,3	0,089
VALOR MÍNIMO	8,6	0,036
Nº DE VALORES	124	98

3.3.3.2 Rendimientos de eliminación

En la Tabla 78 y Tabla 79 se muestran los rendimientos de depuración de la combinación HV3+H4 en cuanto a eliminación de DQO, DBO₅, SST, Nt y Pt. Se toman como valores de entrada los correspondientes a la salida del tanque Imhoff.

Tabla 78. Valores del efluente y rendimiento de la combinación HV3+H4

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	62	85	17	91	< 10	94
DESV. TÍPICA	33	9	15	12	9	9
VALOR MÁXIMO	165	100	70	100	56	100
VALOR MÍNIMO	< 30	57	< 13	31	< 10	39
Nº DE VALORES	99	99	88	88	97	97

Tabla 79. Valores del efluente y rendimiento de la combinación HV3+H4 (continuación)

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	18,4	68	8,9	2
DESV. TÍPICA	6,9	18	2,5	21
VALOR MÁXIMO	35,0	87	13,1	39
VALOR MÍNIMO	5,5	-3	2,5	-53
Nº DE VALORES	46	37	49	38

El comportamiento del H4 como unidad individualizada, en cuanto a eliminación de DQO, DBO₅, SST, Nt y Pt, se analiza en la Tabla 80 y Tabla 81, en las que los porcentajes de reducción se calculan en base a los valores del efluente del H4.

Tabla 80. Valores del efluente y rendimiento del H4

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	62	12	17	30	< 10	45
DESV. TÍPICA	33	52	15	161	9	103
VALOR MÁXIMO	165	76	70	100	56	100
VALOR MÍNIMO	< 30	-17	< 13	-85	< 10	-52
Nº DE VALORES	99	89	88	79	97	96

Tabla 81. Valores del efluente y rendimiento del H4 (continuación)

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	18,4	31	8,9	-5
DESV. TÍPICA	6,9	27	2,5	19
VALOR MÁXIMO	35,0	75	13,1	32
VALOR MÍNIMO	5,5	-72	2,5	-57
Nº DE VALORES	46	44	49	48

La Figura 86 muestra la carga orgánica superficial de entrada frente a la eliminada. El valor de la pendiente, y por tanto el porcentaje de reducción obtenido en cuanto a eliminación de materia orgánica es del 54%.

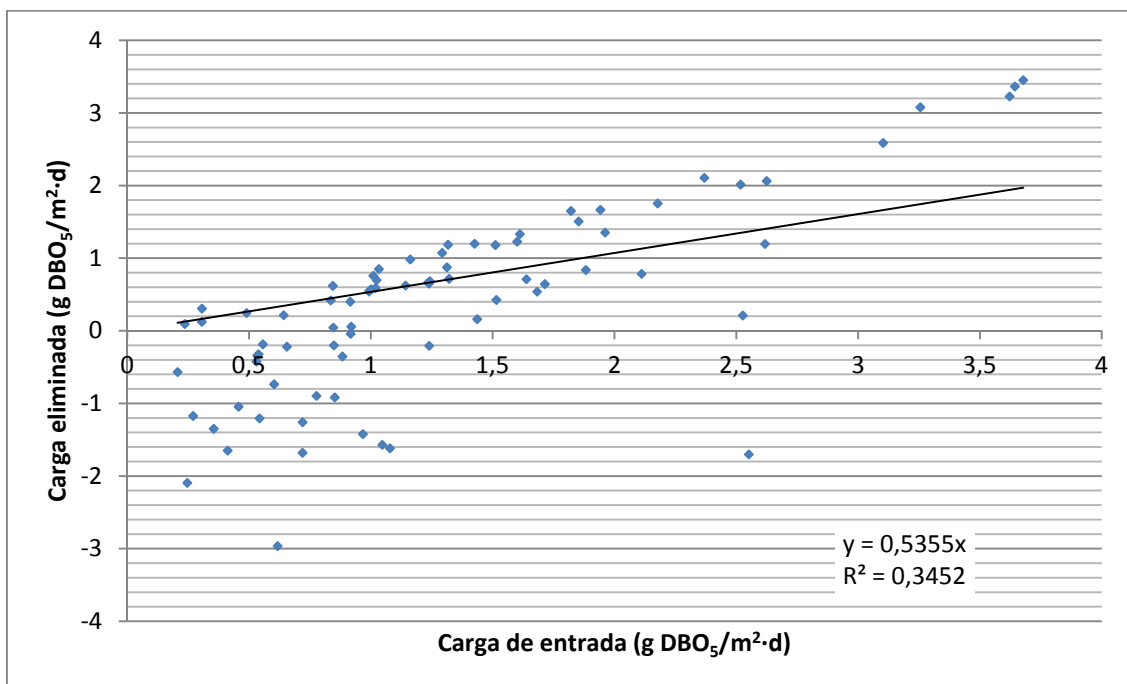


Figura 86. Carga orgánica eliminada frente a carga de entrada en el H4

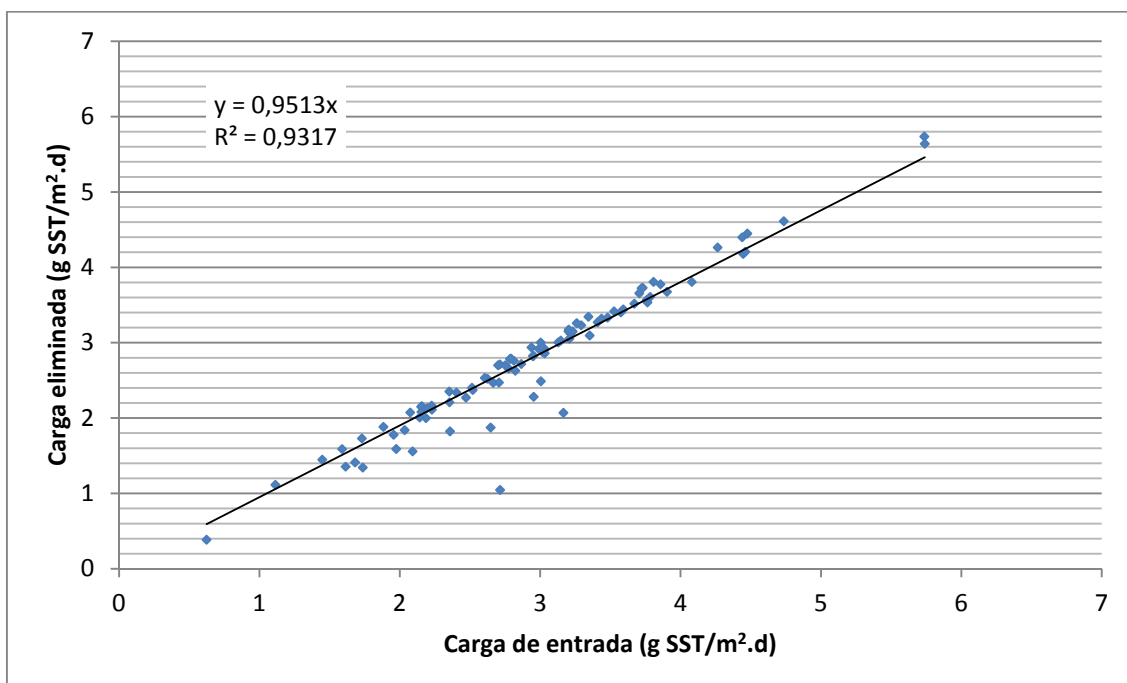


Figura 87. Carga eliminada de SST frente a carga de entrada en el H4

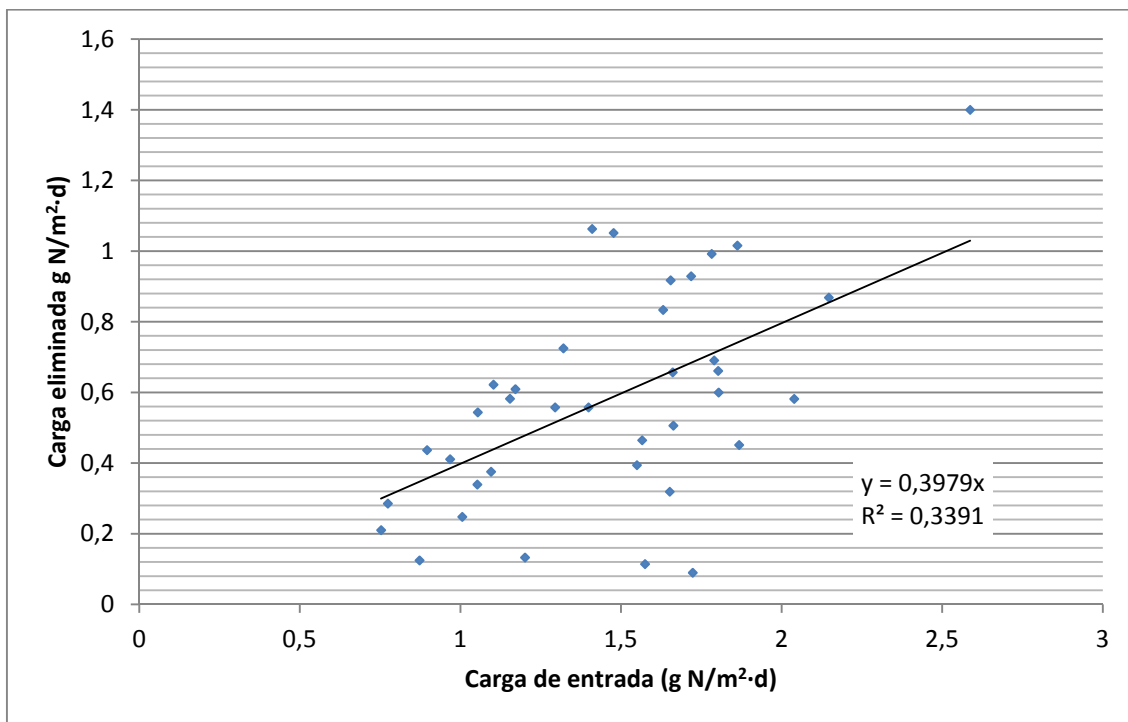


Figura 88. Carga eliminada de Nt frente a carga de entrada en el H4

En cuanto a la eliminación de SST y Nt se obtienen unos porcentajes de reducción del 95% y 40% respectivamente (Figura 87 y Figura 88).

Como se ha comentado los Humedales de Flujo Libre se utilizan como sistemas terciarios. Al ser sistemas tendentes a generar gran biodiversidad es habitual la entrada de materia orgánica en el sistema proveniente de seres vivos que lo colonizan, es por esta razón que en ocasiones el efluente del H4 pueda presentar mayor contenido en materia orgánica de la que le entra, más aún sabiendo que se alimenta del HV3 el cual como hemos visto anteriormente consigue altos rendimientos de eliminación.

3.3.3.3 Rendimientos de depuración globales

Para evaluar los rendimientos globales de depuración se consideran los porcentajes tomando como valores del influente los de entrada al tanque Imhoff y los del efluente de la combinación HV3+H4 (Tabla 82 y Tabla 83).

Tabla 82. Valores globales obtenidos en la combinación HV3+H4

	DQO (mg/l)	% red. DQO	DBO ₅ (mg/l)	% red. DBO ₅	SST (mg/l)	% red. SST
VALOR MEDIO	62	91	17	95	< 10	97
DESV. TÍPICA	33	6	15	5	9	4
VALOR MÁXIMO	165	100	70	100	56	100
VALOR MÍNIMO	< 30	66	< 13	78	< 10	77
Nº DE VALORES	99	99	88	88	97	97

Tabla 83. Valores globales obtenidos en la combinación HV3+H4 (continuación)

	Nt (mg/l)	% red. Nt	Pt (mg/l)	% red. Pt
VALOR MEDIO	18,4	70	8,9	16
DESV. TÍPICA	6,9	13	2,5	23
VALOR MÁXIMO	35,0	88	13,1	57
VALOR MÍNIMO	5,5	26	2,5	-34
Nº DE VALORES	46	44	49	47

Al observar los rendimientos en eliminación de sólidos es destacable la baja concentración de los mismos, lo cual a priori parecería extraño al tratarse de sistemas con lámina de agua expuesta al sol y por consiguiente susceptible del crecimiento algal. La no proliferación de éstas, es debida a la espesa vegetación que hay sobre el mismo y su consiguiente efecto sombra.

Para un estudio más detallado del comportamiento de la combinación HV3+H4 se representa a continuación la evolución de los parámetros analizados a lo largo del estudio en sus distintas etapas (Figura 89 a Figura 100).

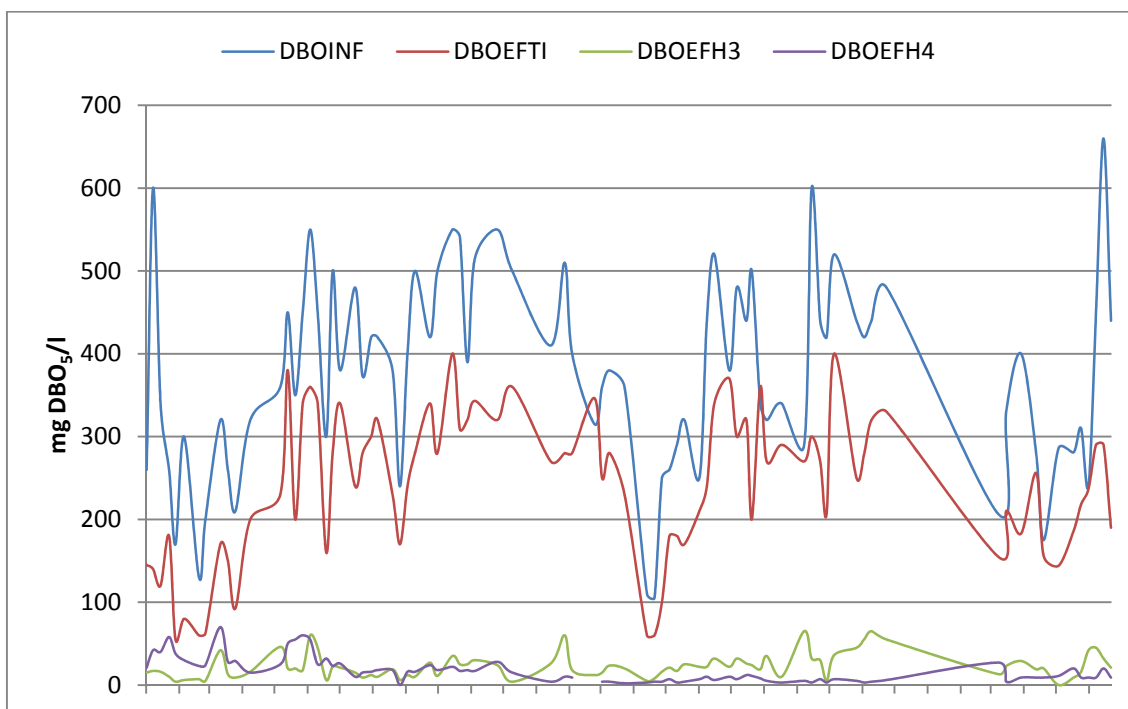


Figura 89. Evolución de la DBO₅ a lo largo del estudio en distintas etapas de HV3+H4

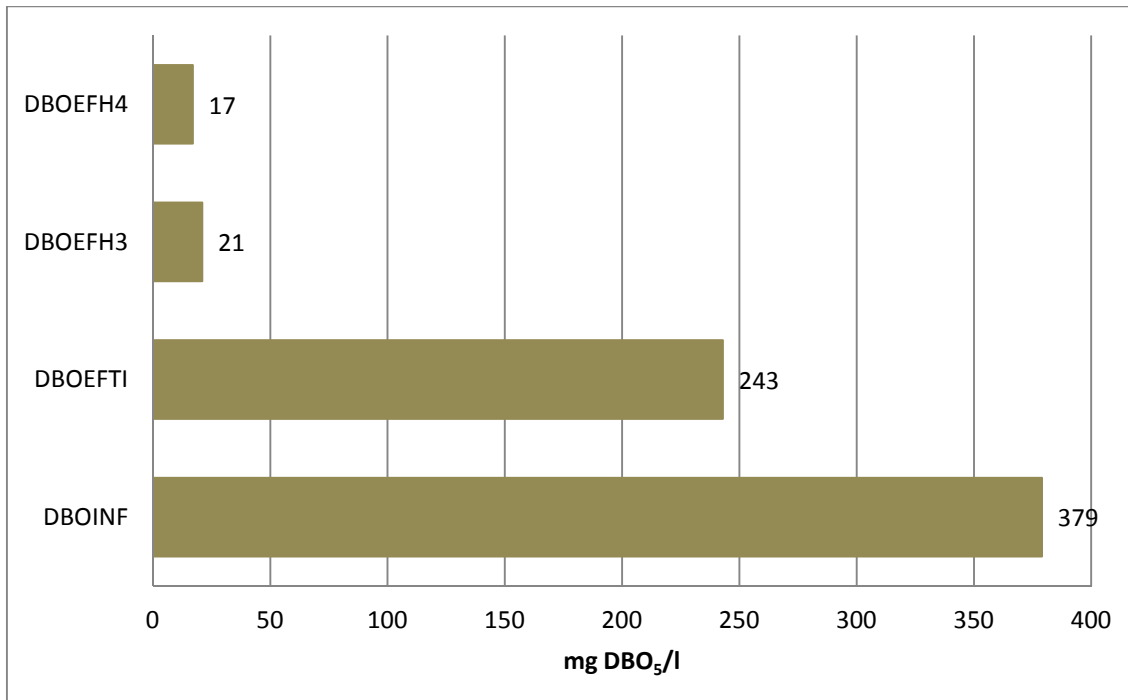


Figura 90. Valores medios de la concentración de DBO₅ a la salida de distintas etapas de HV3+H4

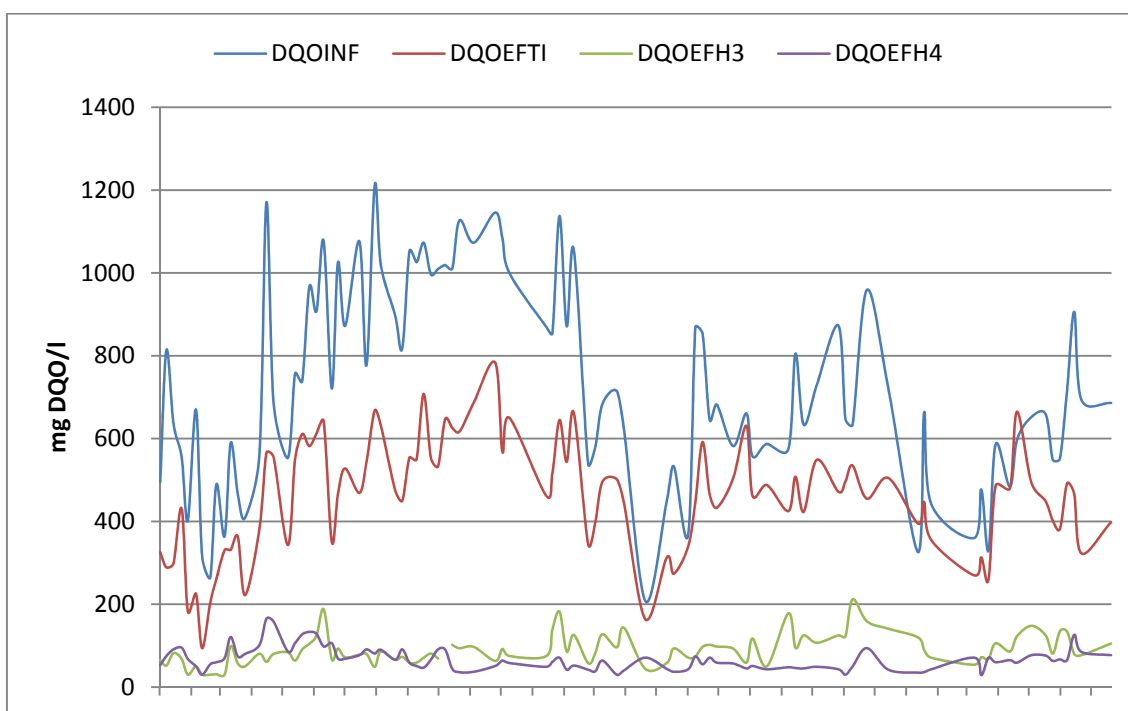


Figura 91. Evolución de la DQO a lo largo del estudio en distintas etapas de HV3+HS4

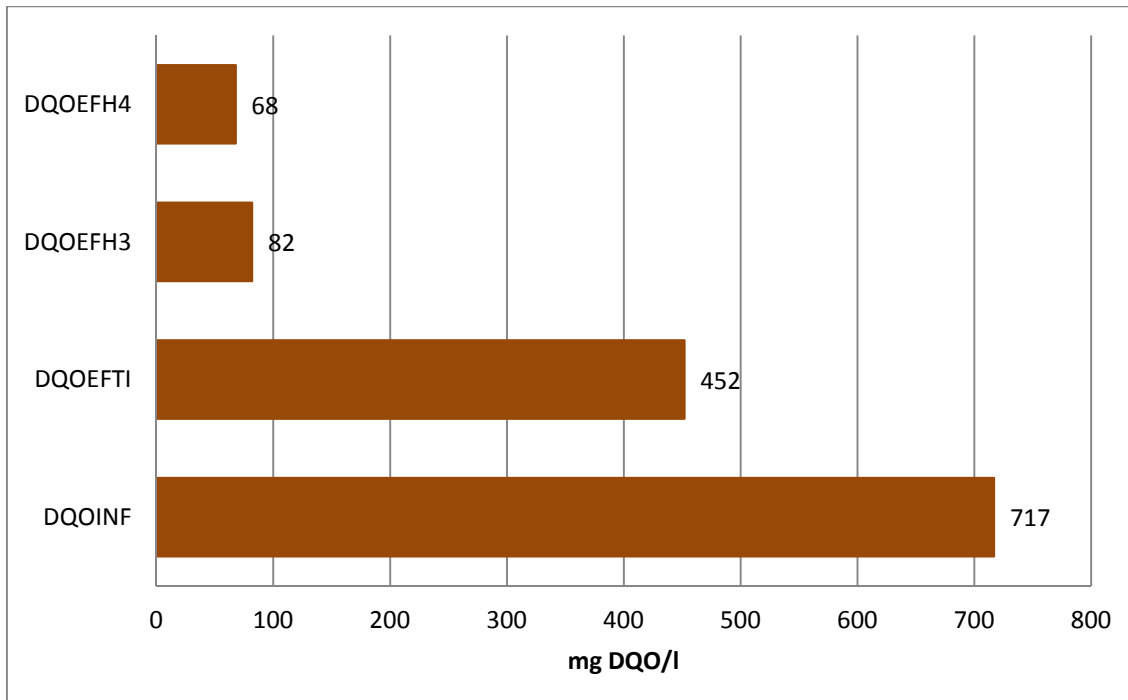


Figura 92. Valores medios de la concentración de DQO a la salida de distintas etapas de la HV3+H4

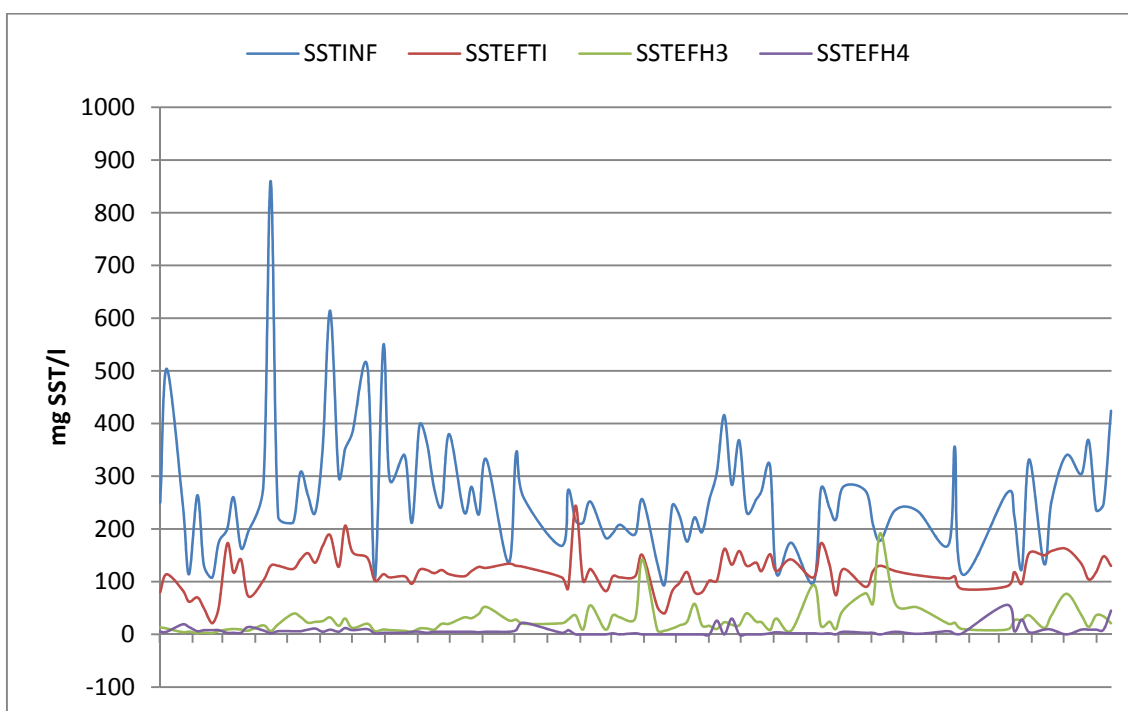


Figura 93. Evolución de los SST a lo largo del estudio en distintas etapas de la HV3+H4

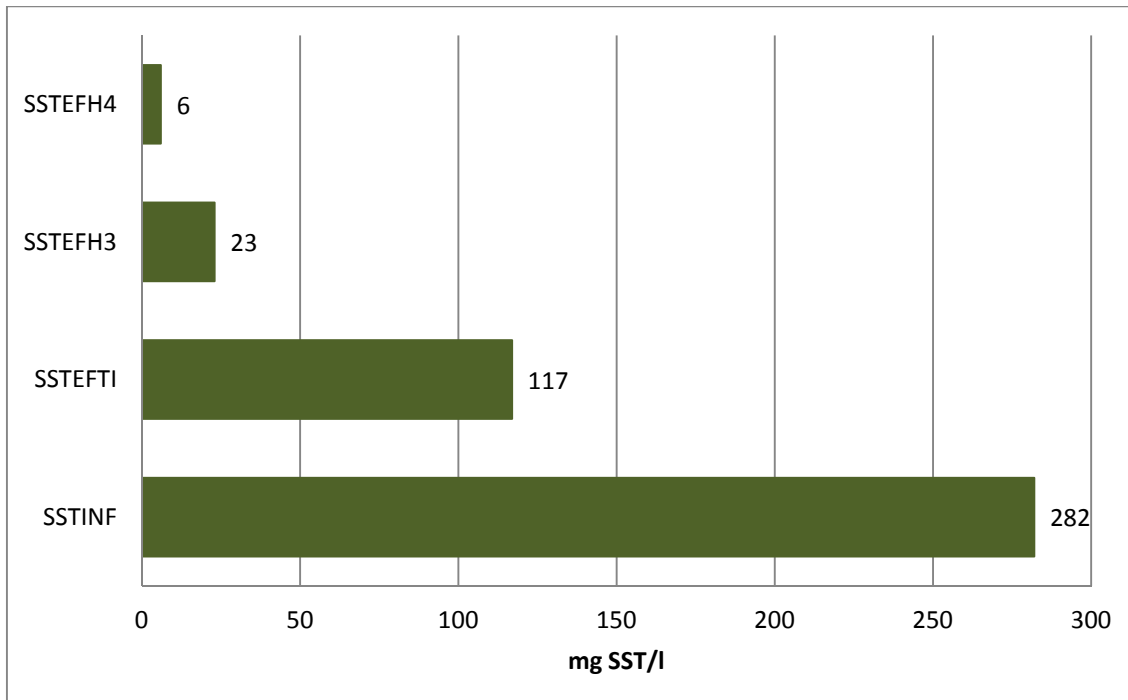


Figura 94. Valores medios de la concentración de SST a la salida de distintas etapas de HV3+H4

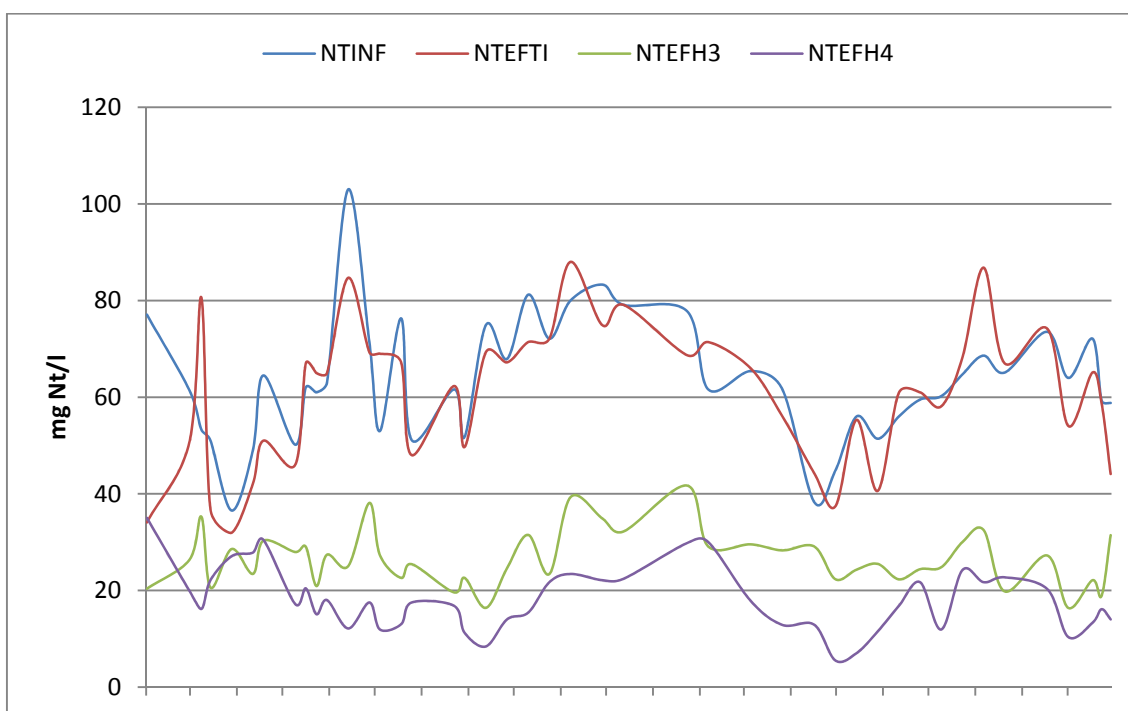


Figura 95. Evolución del Nt a lo largo del estudio en distintas etapas de HV3+H4

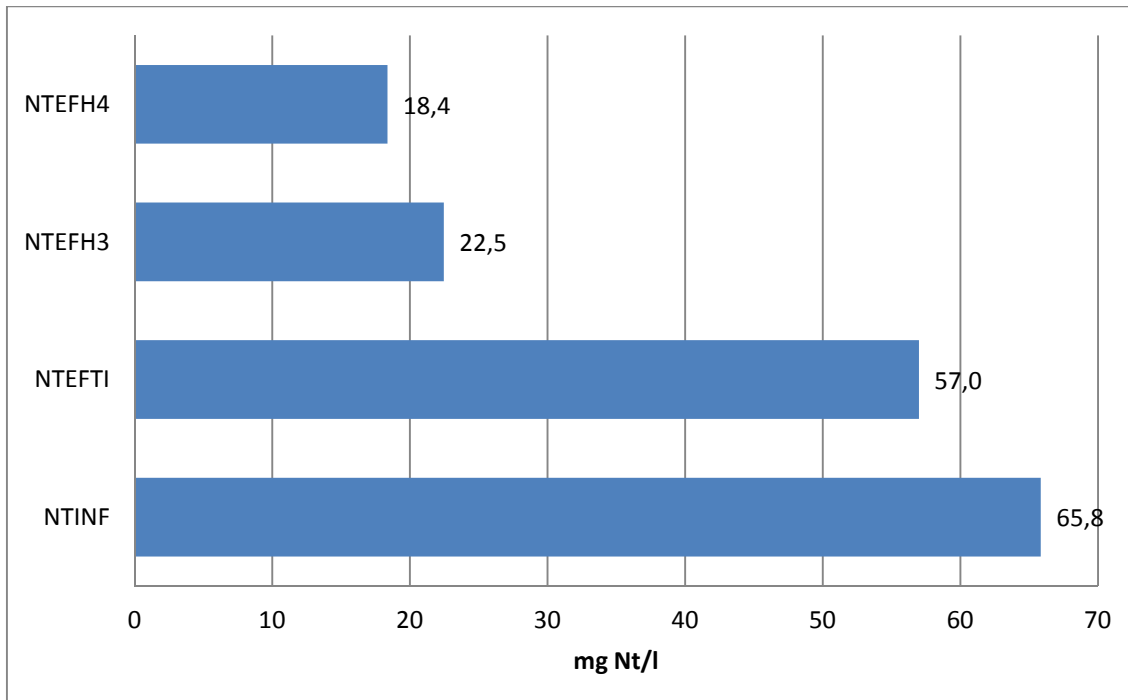


Figura 96. Valores medios de la concentración de Nt a la salida de distintas etapas de HV3+H4

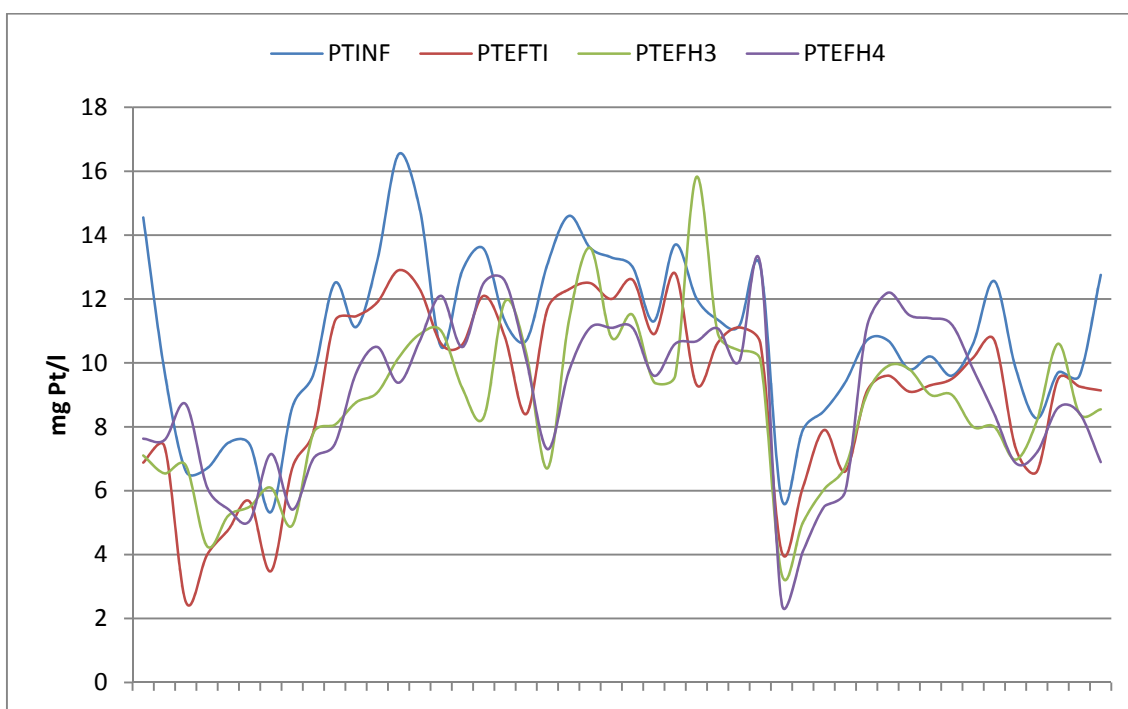


Figura 97. Evolución del Pt a lo largo del estudio en distintas etapas de HV3+H4

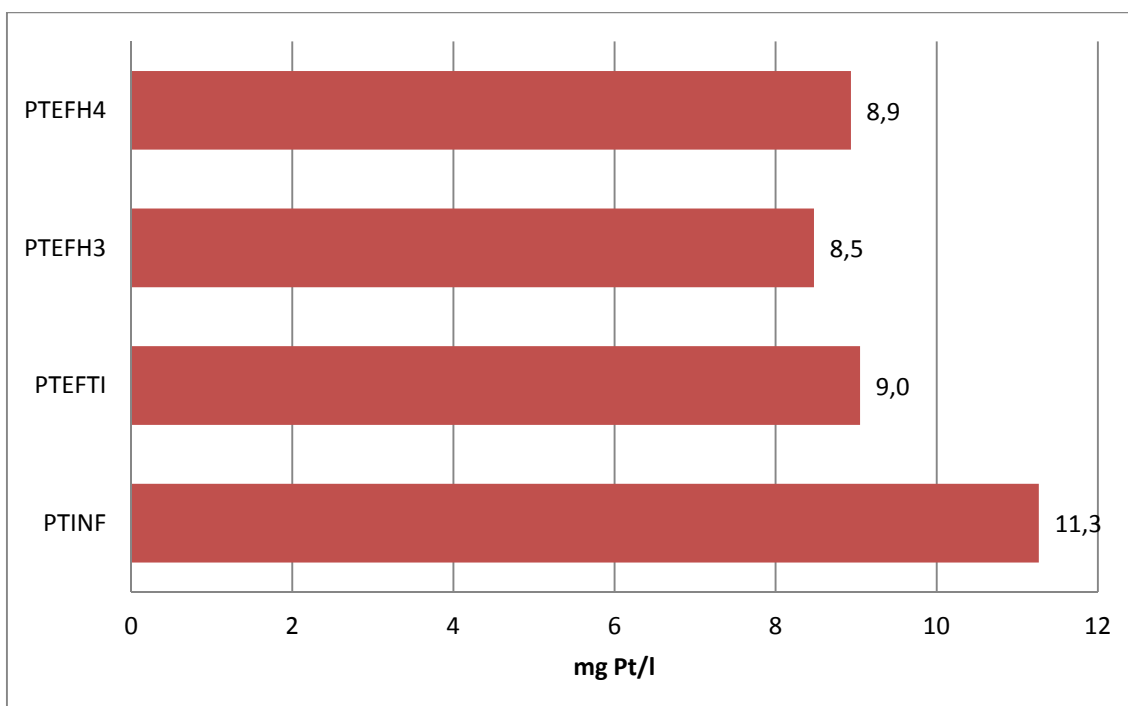


Figura 98. Valores medias de la concentración de Pt a la salida de distintas etapas de HV3+H4

Finalmente, en la Figura 99 se ha representado la evolución de la relación DBO_5/DQO en el agua residual influente y en los efluentes de las distintas etapas de la combinación HV3+H4. Se observa, que el mayor porcentaje de reducción de materia orgánica tiene lugar en el HV3 y en menor medida en el H4.

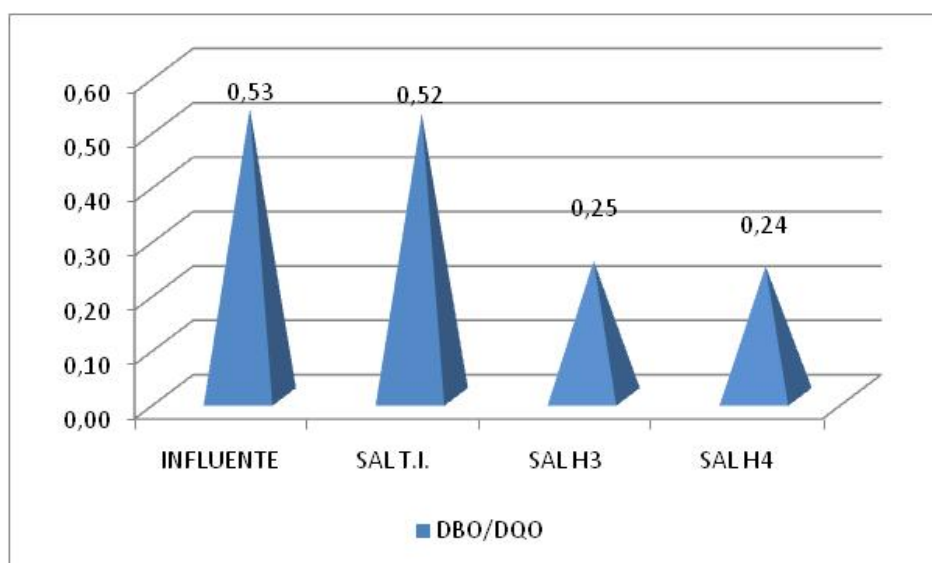


Figura 99. Relación DBO_5/DQO en distintos puntos de HV3+H4

3.3.3.4 Cumplimiento con la normativa de vertidos

Por lo que respecta a los valores absolutos de concentración la Directiva 91/271/CEE se cumple tanto en lo referente a la DQO (62 mg/l), DBO_5 (17 mg/l) y SST (< 10 mg/l). En cuanto a porcentajes de reducción, también se cumple satisfactoriamente con lo establecido legalmente.

Tabla 84. Comparativa con los parámetros de vertido de la combinación HV3+H4

Parámetros	Valores legales		Valores obtenidos	
	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción	Concentración	Porcentaje medio de reducción
DBO_5	25 mg/l	70-90 %	17 mg/l	95 %
DQO	125 mg/l	75 %	62 mg/l	91 %
SST	35 mg/l	90 %	< 10 mg/l	97 %

Referente a la eliminación de nutrientes, ni en el caso del nitrógeno ni del fósforo se estaría de acuerdo a la legislación vigente para vertidos en zonas *sensibles* de aglomeraciones mayores de 2.000 h.e.

Tabla 85. Comparativa con los parámetros de vertido de la combinación HV3+H4

Parámetros	Valores legales		Valores obtenidos	
	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción	Concentración	Porcentaje medio de reducción
Nt	10-15 mg/l	70-80 %	18 mg/l	70 %
Pt	1-2 mg/l	80 %	9 mg/l	16 %

Al igual que en los humedales estudiados anteriormente, en las figuras que se muestran a continuación se representan los distintos valores (para DBO₅, DQO, SST y Nt) que se encuentran por debajo y por encima de los límites permitidos.

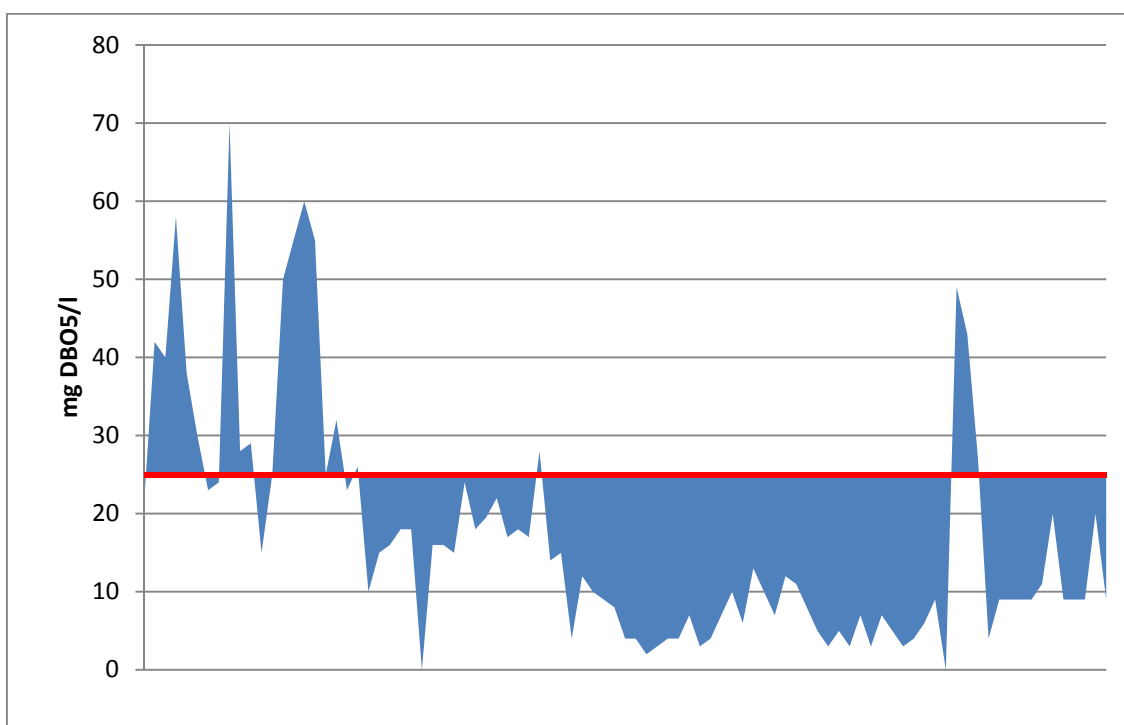


Figura 100. Valores de concentración de DBO₅ a lo largo del estudio en la salida del HV3+h4

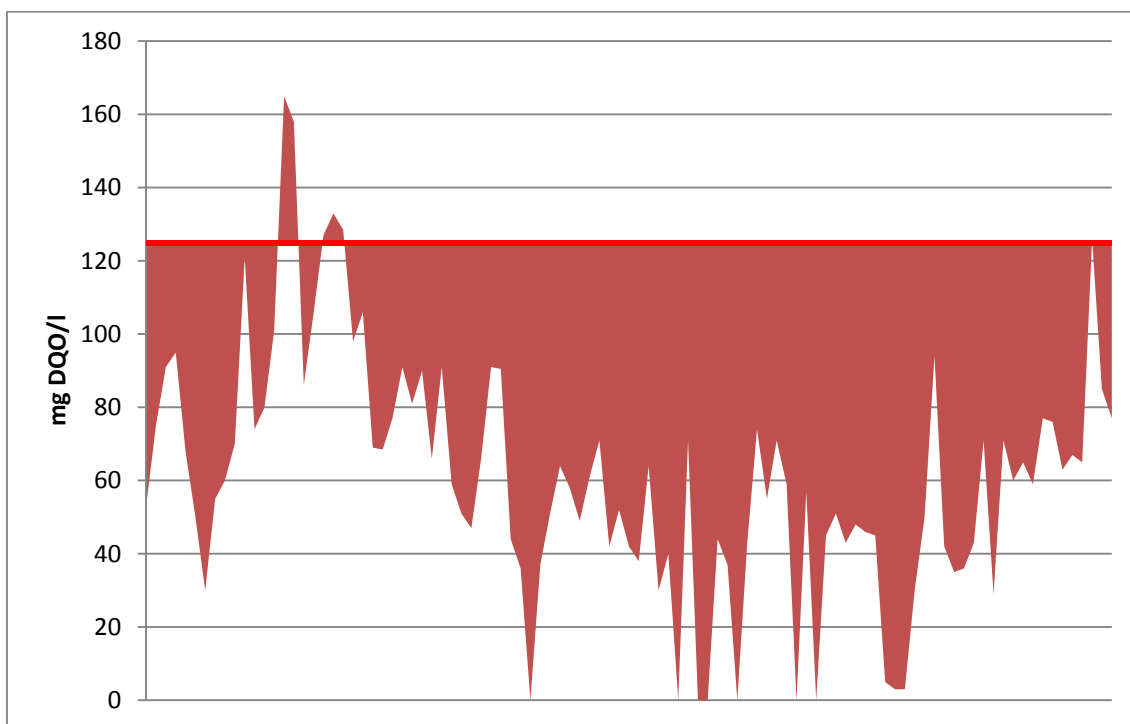


Figura 101. Valores de concentración de DQO a lo largo del estudio en la salida del HV3+H4

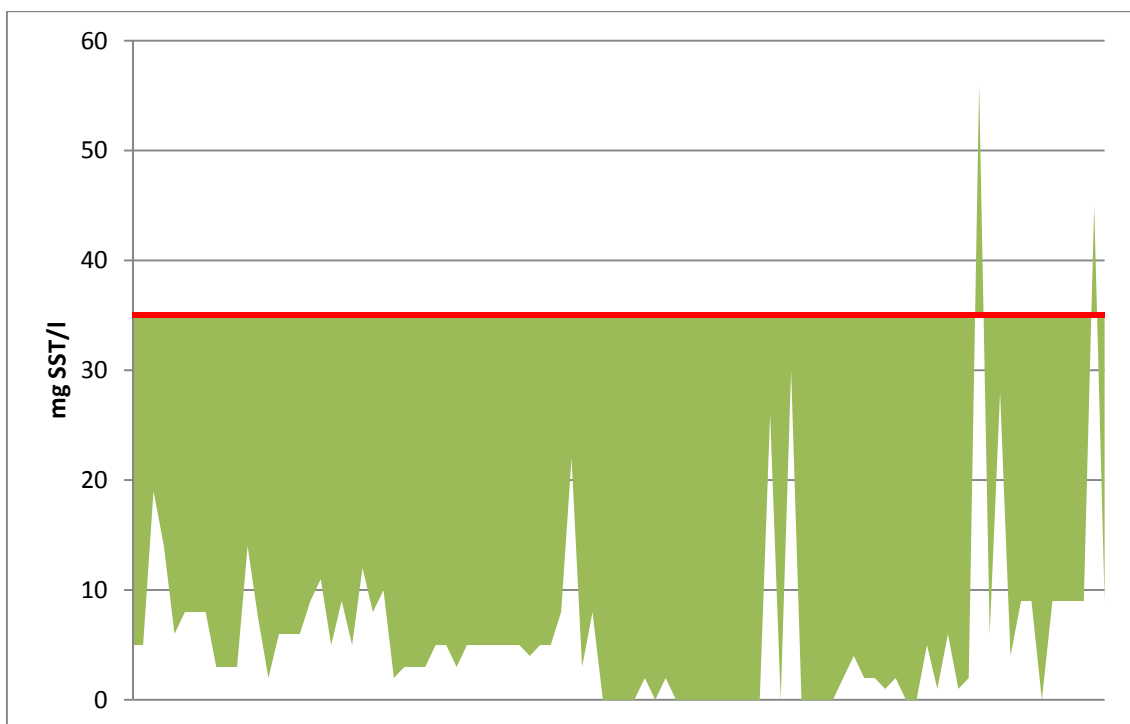


Figura 102. Valores de concentración de SST a lo largo del estudio en la salida del HV3+H4

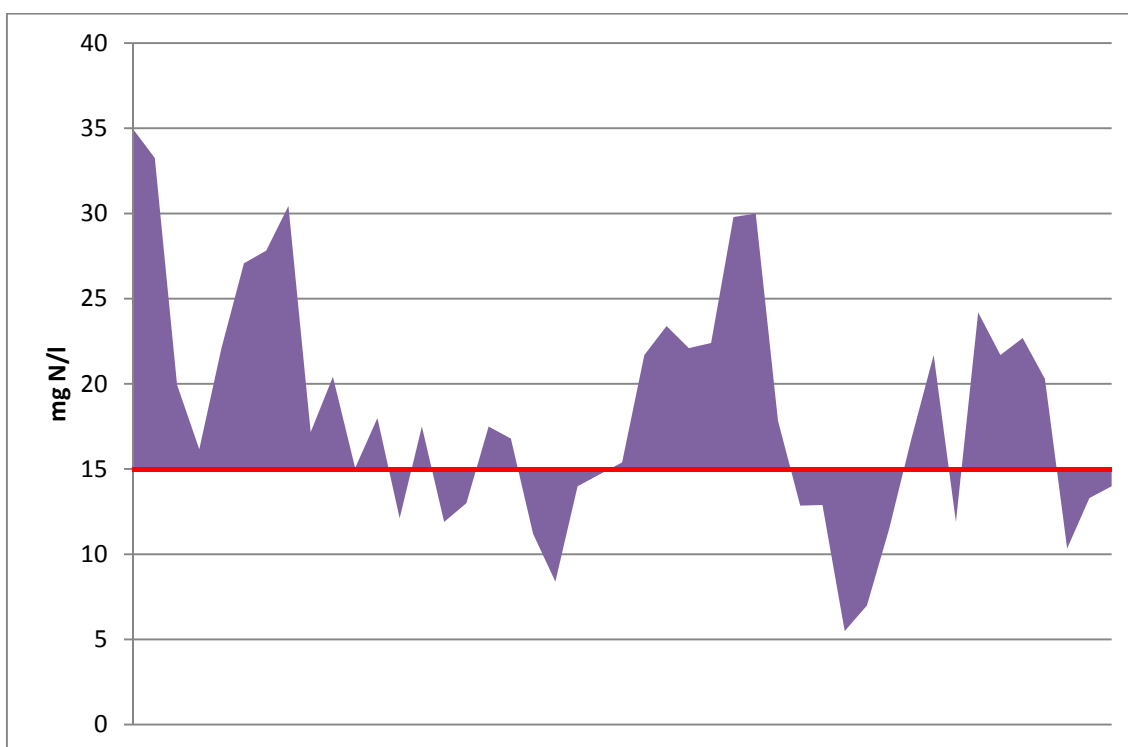


Figura 103. Valores de concentración de Nt a lo largo del estudio en la salida del HV3+H4

En la Tabla 86 se resumen los porcentajes de valores que en la investigación ha estado por debajo de los límites legales de vertido.

Tabla 86. Porcentajes de valores dentro de los límites de vertido en la salida del estudio del HV3+H4

	DBO ₅	DQO	SST	Nt
Porcentaje (%)	83	94	98	38

Estos valores tan altos de cumplimiento en la eliminación de materia orgánica y en suspensión muestran la alta eficiencia del sistema a lo largo del estudio. No siendo así en el caso del nitrógeno en el que el porcentaje de cumplimiento es escaso.

4 COMPARATIVA ENTRE LAS DISTINTAS TIPOLOGÍAS HUMEDALES ARTIFICIALES

4.1 Humedales de Flujo Subsuperficial Vertical y Horizontal

Para establecer una comparación entre las distintas tipologías de Humedales Artificiales, se ha procedido a calcular la máxima carga orgánica superficial aplicable para que los efluentes cumplan con los requisitos de vertido.

Para ello se ha seguido la siguiente metodología:

- Se han agrupados todos los datos de cargas orgánica superficial con las que han operado los Humedales HV1, HV3 y HH2 en 8 rangos diferentes, calculándose el valor medio de la carga para cada rango (Tabla 87)

Tabla 87. Rangos aplicados de carga orgánica superficial y valores medios

HV1		HV3		HH2	
Rango (gDBO ₅ /m ² ·d)	Valor medio (gDBO ₅ /m ² ·d)	Rango (gDBO ₅ /m ² ·d)	Valor medio (gDBO ₅ /m ² ·d)	Rango (gDBO ₅ /m ² ·d)	Valor medio (gDBO ₅ /m ² ·d)
2 – 4	2,9	2 – 4	3,0	2 – 3	2,4
4 – 6	4,8	4 – 6	4,8	3 – 4	3,7
6 – 8	7,5	6 – 8	6,8	4 – 6	5,2
8 – 10	9,2	8 – 10	9,0	6 – 7	6,6
10 – 12	11,1	10 – 11	11,1	7 – 9	8,5
12 – 14	12,8	12 – 14	12,8	9 – 10	9,6
14 – 17	15,7	14 – 16	14,8	10 – 12	11,4
17 – 23	18,5	16 – 21	17,8	12 – 14	12,7

- A cada uno de estos rangos se la ha asociado el correspondiente valor medio de las concentraciones de DBO₅ del efluente, tras eliminar previamente los valores máximos y mínimos de cada rango (Tabla 88).

Tabla 88. Rangos aplicados de carga y valores medios de las concentraciones en los efluentes

HV1		HV3		HH2	
Rango (gDBO ₅ /m ² ·d)	Valor medio (mg DBO ₅ /l)	Rango (gDBO ₅ /m ² ·d)	Valor medio (mg DBO ₅ /l)	Rango (gDBO ₅ /m ² ·d)	Valor medio (mg DBO ₅ /l)
2 - 4	6	2 - 4	6	2 - 3	21
4 - 6	14	4 - 6	10	3 - 4	35
6 - 8	22	6 - 8	15	4 - 6	43
8 - 10	23	8 - 10	20	6 - 7	45
10 - 12	30	10 - 11	22	7 - 9	46
12 - 14	32	12 - 14	26	9 - 10	46
14 - 17	35	14 - 16	27	10 - 12	54
17 - 23	38	16 - 21	29	12 - 14	55

- A partir de los datos de las tablas anteriores se han representado en un gráfico de dispersión, para cada uno de los humedales, el valor medio de la concentración de DBO₅ en el efluente frente al valor medio del rango de carga aplicada (Figura 104, Figura 105, Figura 106).
- A partir de estas gráficas se ha determinado, para cada humedal, la máxima carga orgánica superficial aplicable para que los efluentes tratados cumplan con el requisito de concentración marcado en la Directiva 91/271/CEE (25 mg/l de DBO₅).

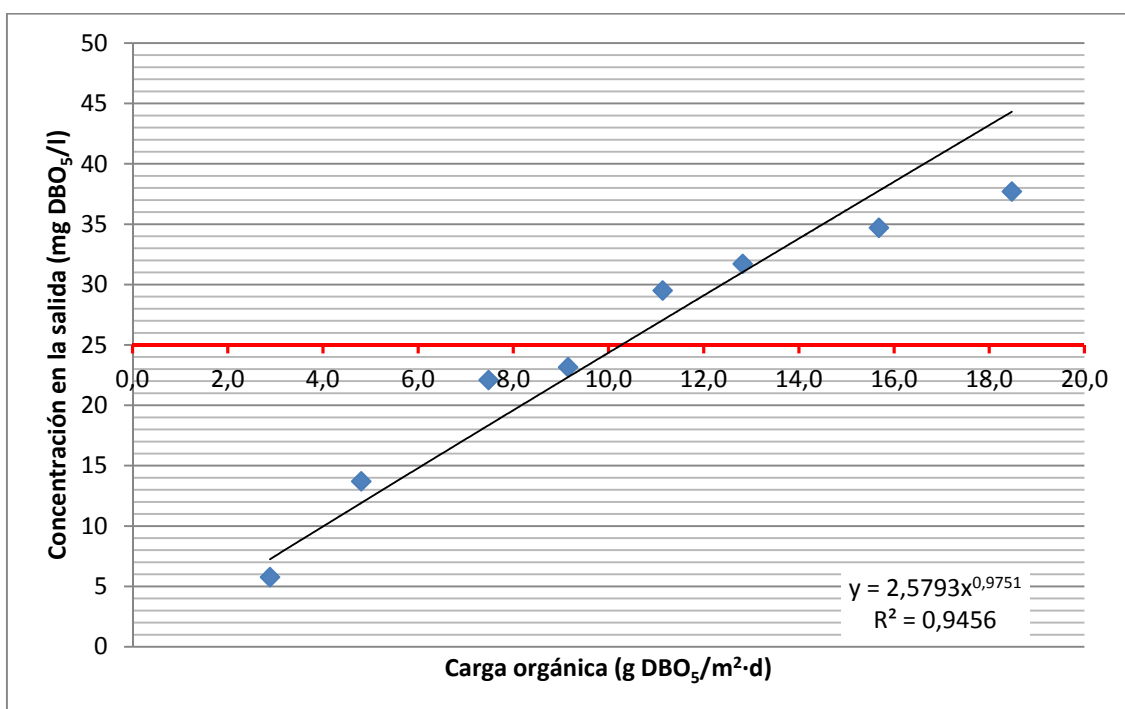


Figura 104. Representación de valores medios de DBO₅ de salida frente a la carga orgánica en el HV1

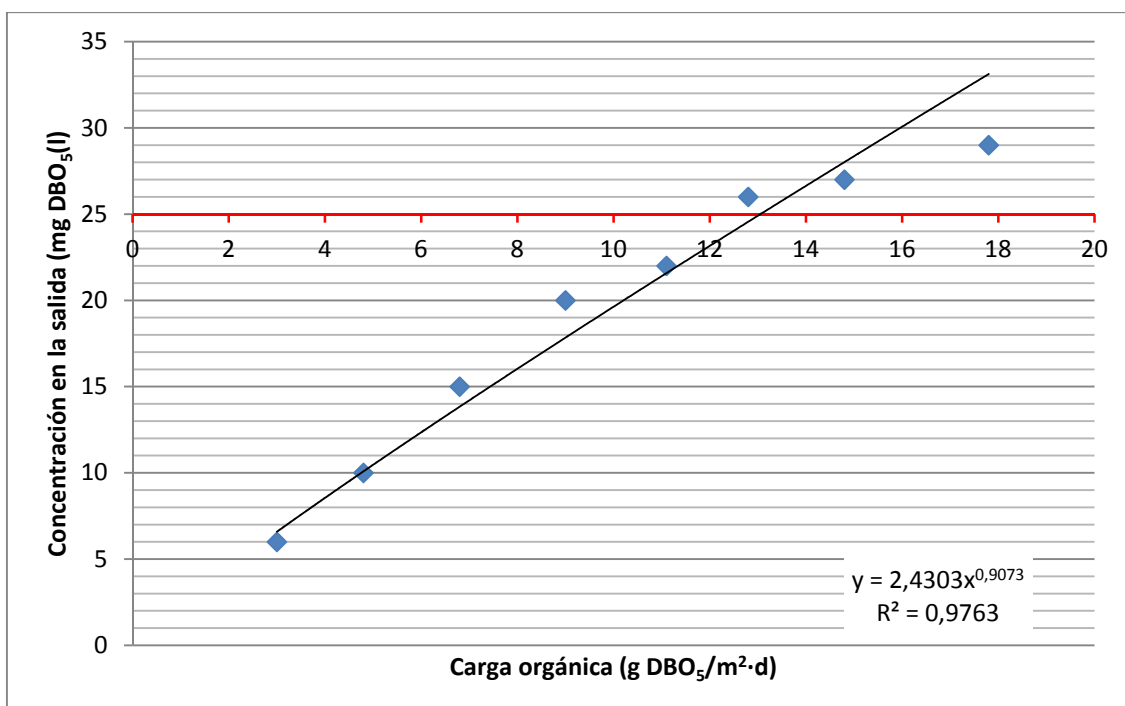


Figura 105. Representación de valores medios de DBO₅ de salida frente a la carga orgánica en el HV3

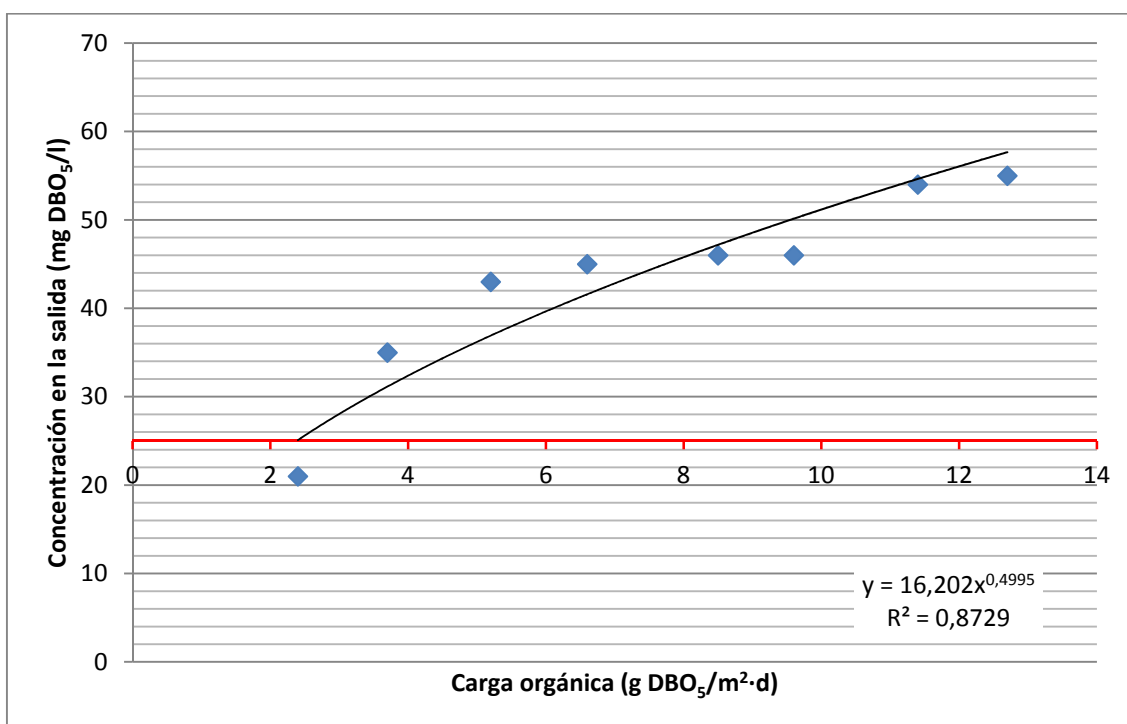


Figura 106. Representación de valores medios de DBO₅ de salida frente a la carga orgánica en el HH2

Del estudio de las figuras anteriores se deduce que:

- En el caso de los Humedales de Flujo Vertical (Figura 104 y Figura 105), para alcanzar los límites de vertido debe operarse con carga orgánicas superficiales inferiores a 10,4 y a 13,0 g DBO₅/m²d para los humedales HV1 y HV3 respectivamente. Estas cargas están referidas a la corriente de salida del tanque Imhoff. Si se toma como referencia el agua residual influente los correspondientes valores serían de 14,1 y 17,7 g DBO₅/m²d, respectivamente (asumiendo un porcentaje de reducción de DBO₅ en el tanque Imhoff del 36%). Estos últimos valores de carga se corresponden con unas necesidades de superficie de 4,2 y 3,4 m²/h.e., para el HV1 y HV3 respectivamente.

Se observa que el HV3 muestra mejor comportamiento en la eliminación de DBO₅ a lo largo del estudio que el HV1, pese a estar sin plantar. Cabe atribuir esta mejor respuesta del HV3 a la granulometría del sustrato empleado (capa intermedia de 3 - 8 mm).

- En el caso del Humedal de Flujo Horizontal para lograr el cumplimiento de los límites de vertido es preciso operar con cargas orgánicas superficiales inferiores a 2,4 g DBO₅/m²d, referidas a la salida del tanque Imhoff, e inferiores 3,3 g DBO₅/m²d si se refiere al agua residual influente. Este último valor de carga se corresponde con una necesidad de superficie de 18,2 m²/h.e.

Se observa que el HH2 precisa trabajar con cargas inferiores a las recogidas en la bibliografía para el cumplimiento de los límites de vertido. Esto puede ser achacable tanto al hecho de que este Humedal no está plantado, por lo que se puede asimilar a un reactor anaerobio de lecho fijo (el papel de la vegetación es más importante en los Horizontales que en los Verticales, al ser la única fuente de oxigenación), como al elevado tamaño del sustrato empleado (12 – 20 mm).

A modo de resumen, para la comparación de las distintas modalidades de humedales, en la Tabla 89 se representan los valores medios de los parámetros más significativos obtenidos a lo largo del estudio.

Tabla 89. Comportamiento de los humedales HV1, HV3 y HH2

	HV1	HV3	HH2
Reducción DBO ₅ (%)	93	95	88
Reducción DQO (%)	86	88	82
Reducción SST (%)	90	90	94
Reducción Nitrógeno total (%)	61	64	28
Reducción Fósforo total (%)	25	24	22
Carga orgánica máxima admitida (g DBO ₅ /m ² ·d)	14,1	17,7	2,4
Relación superficie/h.e. (m ² /h.e.)	4,2	3,4	18,2

A parte del comportamiento en eliminación de materia orgánica, estudiada anteriormente, cabe destacar:

- El Humedal de Flujo Vertical presenta un mejor comportamiento en eliminación de materia en suspensión, achacable al mayor recorrido del agua a través del sustrato

- Ambas tipologías han presentado un comportamiento muy similar en lo referente a la reducción en la concentración de fósforo.
- Para en el caso del nitrógeno, los de Flujo Vertical tienen una mejor respuesta en cuanto a su eliminación, debido fundamentalmente a las condiciones anaerobias/anóxicas en las que operan que permiten los procesos de nitrificación/desnitrificación. En nuestro caso, el Humedal Horizontal al no estar plantado, ha operado básicamente en condiciones anaerobias lo que ha dado lugar a muy bajos rendimientos en la eliminación de este nutriente.

Por último cabe destacar, tal como se comentó anteriormente, que los Humedales de Flujo Vertical han presentado un comportamiento más robusto frente a las variaciones de la composición del agua residual influente.

En cuanto al comportamiento en la eliminación de nutrientes, se ha comprobado que ninguno es efectivo en la eliminación del fósforo y sólo la combinación HV1+HH5 es susceptible de obtener un efluente con valores bajos de nitrógeno.

Para la estimación de cuanta superficie de Humedal Horizontal sería necesaria sumar a la de un Vertical, para cumplimiento de parámetros de vertido, se ha procedido de la siguiente forma:

- Se han agrupados todos los datos de cargas de nitrógeno superficial con las que ha operado el HH5 en 5 rangos diferentes, calculándose el valor medio de la carga para cada rango. A cada uno de estos rangos se la ha asociado el correspondiente valor medio de las concentraciones de Nt del efluente, tras eliminar previamente los valores máximos y mínimos de cada rango (Tabla 90).

Tabla 90. Rangos aplicados de carga de nitrógeno y valores medios en el HH5

Rango (gDBO ₅ /m ² ·d)	Valor medio (gDBO ₅ /m ² ·d)	Valor medio (mg DBO ₅ /l)
0,3 – 1,0	0,7	9,8
1,0 – 1,3	1,2	11,9
1,3 – 1,6	1,5	12,5
1,6 – 1,9	1,8	13,4
1,9 – 3,0	2,3	17,8

- A partir de los datos de las tablas anteriores se ha representado en un gráfico de dispersión, para el HH5, el valor medio de la concentración de Nt en el efluente frente al valor medio del rango de carga aplicada (Figura 107).
- A partir de estas gráficas se ha determinado la máxima carga de nitrógeno superficial aplicable para que los efluentes tratados cumplan con el requisito de concentración marcado en la Directiva 91/271/CEE (tomamos el valor de 15 mg/l de Nt).

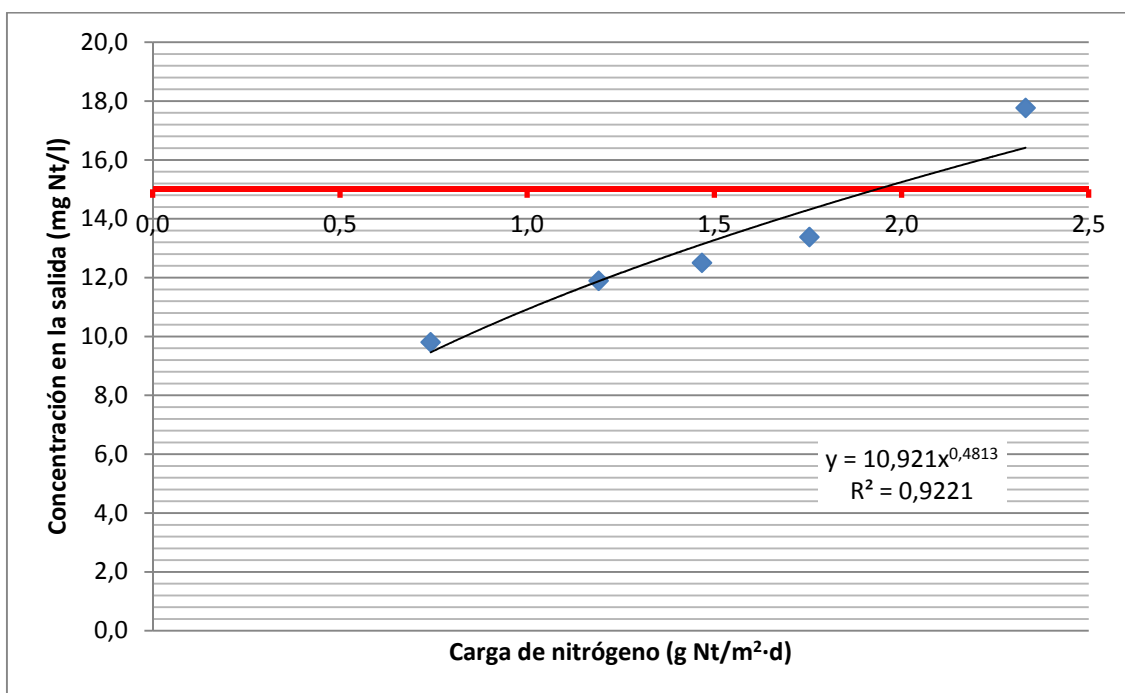


Figura 107. Representación de valores medios de Nt de salida frente a la carga orgánica en el HH5

Del estudio de la figura anterior se deduce que:

- En el caso del Humedal HH5, para alcanzar los límites de vertido debe operarse con carga de nitrógeno superficial inferiores a $1,95 \text{ g N/m}^2\text{d}$.

A continuación realizamos las siguientes operaciones:

- Con los datos medios de la investigación (una concentración media de entrada en el HH5 de $23,6 \text{ mg N/l}$ y un caudal de $14,3 \text{ m}^3/\text{d}$), calculamos que la cantidad de nitrógeno que está entrado en dicho humedal es de $337,5 \text{ g N/d}$.
- A razón de $1,95 \text{ g por m}^2$, para los 337 g N/d se necesitarían de una superficie de 173 m^2 .
- Conociendo que la superficie del humedal HV1 (el que alimenta al HH5) es de 317 m^2 , se extrapola que para el cumplimiento de vertidos en cuanto a nitrógeno es necesario adicionar a la superficie de Humedal de Flujo Vertical un 55 % más de Humedal de Flujo Horizontal.
- Si extrapolamos a la superficie requerida por habitante equivalente obtenemos que necesitaríamos, para alcanzar los niveles adecuados de eliminación de nitrógeno, $6,5 \text{ m}^2/\text{h.e.}$ de la combinación HV1+HH5.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

En el Capítulo de Resultados y Discusión se han expuesto y analizado en detalle los resultados obtenidos en el transcurso de las investigaciones llevadas a cabo para cumplir los objetivos planteados en la presente Tesis. A continuación, se resumen las principales conclusiones obtenidas:

Primera: Las distintas modalidades de Humedales Artificiales sometidas a estudio han presentado comportamientos diferentes en lo que a la eliminación de los parámetros indicadores de contaminación de las aguas residuales, hace referencia. Esta circunstancia justifica su disposición en distintas ubicaciones a lo largo de una línea de tratamiento.

Segunda: La modalidad de Humedal de Flujo Vertical ha presentado un mejor comportamiento que la de Flujo Horizontal. Aun operando con niveles de carga más elevados, en los Humedales de Flujo Vertical se han alcanzado mayores rendimientos de eliminación de materia orgánica y nitrogenada.

Tercera: Se ha comprobado en los Humedales de Flujo Vertical sometidos a estudio (plantados y sin plantar), que el tipo de sustrato filtrante empleado, su granulometría y espesor, ejercen una mayor influencia en los rendimientos de depuración que se alcanzan, que el hecho de que cuenten o no con vegetación. Dichas características del sustrato influyen en la relación superficie necesaria por habitante equivalente.

Cuarta: En los Humedales de Flujo Horizontal, que durante las investigaciones han operado en cola de humedales previos, se ha observado un mejor comportamiento con espesores de sustratos de 40 cm, que con el valor que se suele recomendar de 60 cm. Un menor espesor permite una mayor densidad de raíces y rizomas en la totalidad del medio filtrante.

Quinta: Con la disposición de un Humedal de Flujo Superficial en cola de uno de Flujo Vertical, se logra que el vertido final presente una composición más homogénea en el tiempo, a la vez que se alcanzan importantes reducciones de materia en suspensión y de nitrógeno. Esto se debe principalmente al incremento en los tiempos de retención hidráulico, así como a la posibilidad de

sucederse fenómenos de desnitrificación que culminen con el proceso global de eliminación del nitrógeno.

Sexta: En lo referente a la eliminación de nitrógeno, la combinación de humedales en serie, de Flujo Vertical y Horizontal, ha permitido que los efluentes tratados cumplan los requisitos de vertido en *zonas sensibles*. La superficie adicional necesaria de Humedal Horizontal se ha cuantificado en el 55% de la superficie del Humedal Vertical, ubicado en cabecera del tratamiento.

Séptima: Como ocurre en otras tecnologías de tratamiento, las reducciones que se alcanzan en las concentraciones de fósforo mediante el empleo de Humedales Artificiales no permiten el vertido de los efluentes tratados en *zona sensibles*, siendo necesarios tratamientos adicionales, generalmente de carácter fisicoquímico.

Octava: En resumen, puede concluirse, que la tecnología de Humedales Artificiales constituye una solución válida para el tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas. Presentando una gran robustez para hacer frente a las fuertes oscilaciones de caudal y cargas a tratar, típicas de este rango poblacional.

A la vista de los resultados obtenidos, se constata la necesidad de seguir investigando en la tecnología de Humedales Artificiales, principalmente en lo referente a:

- Empleo de Humedales Artificiales como sistemas de depuración de corrientes distintas al agua residual urbana. En este sentido irían los estudios de la aplicabilidad del tratamiento por ejemplo sobre aguas residuales agroindustriales, fangos de depuradoras, lixiviados agrícolas o aguas pluviales.
- Evaluación de la eficiencia de los Humedales Artificiales en la eliminación de ciertos contaminantes, tales como metales pesados o contaminantes orgánicos (haciendo especial hincapié en aquellos incluidos en la lista de prioritarios de la Directiva Marco del Agua).

- Mejoras de aspectos constructivos y de diseño que favorezcan por un lado el incremento de eficiencia en la eliminación de carga contaminante (por ejemplo el estudio de determinados sustratos cuya naturaleza provoque una reducción de la concentración de fósforo en el efluente), y por otro la mejora de la operación y mantenimiento (por ejemplo nuevos diseños del sistema de alimentación y distribución que favorezcan el mejor reparto del agua influente).
- Profundizar en el empleo de los Humedales Superficiales como sistemas de transición entre el vertido y el medio receptor. Estos estudios se centrarían en investigación sobre capacidad de generación de biodiversidad e integración en el medio natural.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Allen RG., Pereira LS., Raes D., Smith M., (1998). *Crop evapotranspiration*. Guidelines for computing crop water requirements.

Andrews T. (1996). *Personal communication*. Ouray, CO, FWS wetlands performance data.

Arias CA., Brix H., Marti E., (2005). *Recycling of treated effluents enhances removal of total nitrogen in vertical flow constructed wetlands* Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering 40, 1431-1443.

Awad AM., Saleh HI. (2001). *Evaluating Contaminants Removal Rates in Sub-Surface Flow Constructed Wetland in Egypt*. Proceedings of the 2001 Wetlands Engineering & River Restoration Conference, August 27-31, Reno, Nevada.

Bahlo KE., Wach FG., (1990). *Purification of domestic sewage with and without faeces by vertical intermittent filtration in reed and rush beds*. In: Cooper, P.F., Findlater, B.C. (Eds.), *Constructed wetlands in water pollution control*. Pergamon Press, Oxford, page 215-221.

Barret EC., Sobsey MD., House CH., White KD. (2000). *Microbial indicator removal in on-site constructed wetlands for wastewater treatment in the Southeastern US*. 7th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Lake Buena Vista, Florida, vol.1, pp. 383-388.

Brenner A., Messalem R. (2002). *Wastewater Treatment and Reuse in Israel: Policy and Applications*. International Congress Wastewater Treatment in Small Communities, Seville (Spain), March 20-22, 2002.

Brix H. (1987 a). *The applicability of the wastewater treatment plant in Othfresen as scientific documentation of the root-zone method*. Water Science and Tech. 19, 19-24.

Brix H. (1987 b). *Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants - the root-zone method*. Water Science and Tech. 19, 107-118.

Brix H. (1993). *Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: transport mechanisms and rates*. Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Moshiri G.A. (ed.), Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp. 391-398.

Brix H. (1998). *Denmark*, in: *Constructed Wetlands for Treatment in Europe*, J. Vymazal, H. Brix, P.F. Cooper, M.B. Green and R. Haberl. Eds. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, pp. 123-156.

Brix H. (2007 a). *Types and applications of constructed wetland systems – recent developments*. 2nd International Congress Wastewater Treatment in Small Communities, Seville (Spain), November 11-15 2007.

Brix H., Arias CA., (2005). *Danish guidelines for small-scale constructed wetland systems for onsite treatment of domestic sewage*. Wat. Sci. Tech. 51, 1-9.

Brix H., Schierup HH. (1989). *Sewage treatment in constructed reed beds - Danish experiences*. Water Science and Tech. 21, 1665-1668.

Brix H., Schierup HH., Arias CA. (2007 b). *Twenty years experience with constructed wetland systems in Denmark – what did we learn?*. Water Science and Tech. 56, 63-68.

Bulc T. (2002). *Development of CW in Slovenia*. International Congress Wastewater Treatment in Small Communities, Seville (Spain), March 20-22, 2002.

Bulc T., Zupancic M., Vrhovsek D. (2003). *CW experiences in Slovenia: development and application*. Proceedings of the conference “Constructed wetlands: applications and future possibilities, 90-105, Volterra, Italy.

Caselles-Osorio A., García J. (2006). *Perfomance of experimental horizontal subsurface flow constructed wetlands fed with dissolved or particulate organic matter*. *Water Research* 40 (19), 3603-3611.

CENTA. (2008). *Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (memoria de actividad 2003-2007)*. Ed. Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua, 129 pp.

Chen TY., Kao CM., Yeh TY., Chien HY., Chao AC. (2006). *Application of a constructed wetland for industrial wastewater treatment: a pilot-scale study*. *Chemosphere* 64 (3): 497-502.

Collado N. (2000). *Análisis Económico de Sistemas Naturales de Depuración en Núcleos Rurales*. ETSECCPB dissertation, Technical University of Catalonia, 89 pp.

Conte G., Martinuzzi N., Giovannelli L., Pucci B., Masi F. (2001). *Constructed wetlands for wastewater treatment in central Italy*. *Water Science and Tech.*, 44 (11-12), 339-343.

Cooper PF. (2003). *Sizing vertical flow and hybrid constructed wetland systems*. The use of aquatic Macrophytes for wastewater treatment in constructed wetland, 1st International Seminar. Dias V. y Vymazal J. (eds), Instituto Nacional da Agua, Lisboa, Portugal, 195-218.

Cooper PF., (1990). *Foreword*. In: *Constructed Wetlands in Water pollution Control*. PF. Cooper & BC. Findlater (ed.), Pergamon Press Oxford, xi.

Cooper PF., (1999). *A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems*. *Wat. Sci. Technol.* 40, 1-9.

Cooper PF., (2004). *The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rate*. Proceedings of the 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Avignon (France), September 2004 153-160.

Cooper PF., Job GD., Green MB., Shutes RBE. (1996). *Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. WRc Publications, Medmenham, Marlow, 184 pp.

Coppola A., Santini A., Botti P., Vacca S., Comegna V., Severino G. (2004). *Methodological approach for evaluating the response of soil hydrological behavior to irrigation with treated municipal wastewater*. J. Hydrol. 292, 114-134.

COPT, Junta de Andalucía (1997). *Planta Experimental de Depuración de Aguas Residuales* Ed. Junta de Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Transporte.

Crites R., Dombeck G., Williams C., (1996). *Two Birds with One Wetland: Constructed Wetlands for Effluent Ammonia Removal and Reuse Benefits*. Proceeding of WEFTEC 96, Water Environment Federation, Dallas, TX.

Crites R., Tchobanoglous A. (1998). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. McGraw-Hill, New York.

Decamp O., Warren A., Sánchez R. (1999). *The role of ciliated protozoa in subsurface flow wetlands and their potential as bioindicators*. Water Science and Tech. 40 (3): 91-98.

El Hamouri B., Nazih J., Lahjouj J. (2007). *Subsurface-horizontal flow constructed wetland for sewage treatment under Moroccan climate conditions*. Desalination, 215, 153–158.

Esser D., Pietri C., Murillo B., (2007). *A compact one-stage reed bed filter providing primary and secondary treatment for small communities*. 2nd International Congress Wastewater Treatment in Small Communities, Seville (Spain), November 11-15, 2007.

Faulwetter J.L., Gagnon V., Sundberg C., Chazarenc F., Burr M.D., Brisson J., Camper A.K., Stein O.R. (2009). *Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review*. Ecological Engineering 35 (6), 987-1004.

García J. (2007). *Integrated approach to design and operate low capacity sewage treatment works*. 2nd International Congress Wastewater Treatment in Small Communities, Seville (Spain), November 11-15, 2007.

García J., Aguirre P., Mujeriego R., Huang Y., Ortiz L., Bayona JM. (2004). *Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater*. Water Res., 38 (7), 1669-1678.

García J., Chiva J., Aguirre P., Alvarez E., Sierra JP., Mujeriego R. (2004 b). *Hydraulic behaviour of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and granular medium size*. Ecol. Eng. 23,177-187.

García J., Ojeda E., Sales E., Chico F., Píriz T., Aguirre P., Mujeriego R. (2003). *Spatial variations of temperature, redox potential, and contaminants in horizontal flow reed beds*. Ecology Eng., 21, 129-142.

Gearheart R., Klopp F., Allen G., (1989). *Constructed free surface wetlands to treat and receive wastewater: pilot project to full scale*. Constructed Wetland for Wastewater Treatment; Municipal, Industrial and Agricultural. DA. Hammer, ed. Lewis Publishing, Chelsea, MI.

Gerba CP., Thurston JA., Falabi JA., Watt PM., Karpiscak MM. (1999) *Optimization of artificial wetland design for removal of indicator microorganisms and pathogenic protozoa*. Water Science and Tech. 40 (4-5): 363-368.

Greiner RW., Jong J.D. (1984). *The use of marsh plants for the treatment of waste water in areas designated for recreation and tourism*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Lelystad.

Hadad HR., Maine MA., Bonetto CA. (2006). *Macrophyte growth in a pilot-scale constructed wetland for industrial wastewater treatment*. Chemosphere 63 (10): 1744-1753.

Hagendorf U., Diehl K., Feuerpfeil I., Hummel A., Szewzyk R. (2000). *Retention of microbiological organisms in constructed wetlands*. 7th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Lake Buena Vista, Florida, vol.1, pp. 391-396.

Hammer D. (1989). *Constructed wetlands for wastewater treatment: municipal, industrial and agricultural*. Michigan, USA: Lewis Publishers Inc.

Hammer D., Knight RL. (1994). *Desingning constructed wetlands for nitrogen removal*. Water Science and Tech. 29 (4): 15-27.

Herkowitz J., Black S., Lewandowsky W. (1987). *Listowel artificial marsh treatment project. Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery*. KR. Reddy & WH. Smith Eds. Magnolia Publishing, Orlando, FL.

Hernández A., Hernández A., Galán P. (1995). *Manual de Depuración Uralita*. Editorial Paraninfo SA. Madrid.

Higgins JM., El-Qousey D., Abul-Azm AG., Abdelghaffar M. (2001). *Lake Manzala Engineered Wetland, Egypt*. Proceedings of the 2001 Wetlands Engineering & River Restoration Conference, August 27-31, Reno, Nevada.

Howard-Williams C. (1985). *Cycling and retention of nitrogen and phosphorus in wetlands a theoretical and applied perspective*. Freshwater Biol., 15: 391-431.

Huang Y., Ortiz L., García J., Aguirre A., Mujeriego R., Bayona JM. (2004). *Use of headspace solid-phase microextraction to characterize odour compounds in subsurface flow constructed wetland for wastewater treatment*. Water Sci. Technology, 49 (9), 89-98.

Jong JD. (1976). *The purification of wastewater with the aid of rush or reed ponds*. Tourbier J., Pierson RW.Jr. (Eds.), Biological control of water pollution. Univ. Pennsylvania Press, Philadelphia, page 133-139.

Kadlec RH., Knight RL. (1996). *Treatment Wetlands* Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.

Kadlec RH., Knight RL., Vymazal J., Brix H., Cooper P., Haberl R. (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing, 155 pp.

Kadlec RH., Waller SD. (2009). *Treatment Wetlands. Second edition*. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton. 1015 pp.

Kickuth R. (1970). *Ökochemische leistungen höherer pflanzen*. Naturwiss. 57, 55-61.

Kickuth R. (1977). *Degradation and incorporation of nutrients from rural wastewater by plant hydrosphere under limnic conditions*. Utilization of Manure by Land Spreading. Comm. Europ. Commun., EUR 5672e, London, pp. 335-343.

Kickuth R. (1980). *Abwasserbehandlung im Wurzelraumverfahren*. Wlb "wasser,luft und betrieb", 11, 21-24.

Kickuth R. (1981). *Abwasserreinigung in Mosaikmatritzen aus aeroben and anaeroben Teilbezirken*. Grundlagen der Abwasserreinigung, F Moser, ed. Verlag Oldenburg, Munchen, Wien, pp. 639-665.

Kickuth R. (1982). *A low-cost process for purification of municipal and industrial waste water*. Der Tropenlandwirt 83, 141-154.

Knight RL., McKim TW., Kohl HR. (1987). *Performance of a natural wetland treatment system for wastewater management*. Journal Water Poll. Control Fed 59 (8), 746-754.

Lee BH., Scholz M. (2007). *What is the role of Phragmites australis in experimental constructed wetland filters treating urban runoff?*. Ecological Engineering 29 (1): 87-95.

Lesavre J., Iwema A. (2002). *Dewatering of sludge coming from domestic wastewater treatment plant by planted sludge beds. French situation*. Proceedings, 8th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Arusha, Tanzania, 16-19 of September 2002, 1193-1205.

Liebowitz BL., Collins AG., Theis TL., Young TC. (2000). *Subsurface flow wetland for wastewater treatment at Minoa, New York*. State Energy Research and Development Authority: New York.

Liénard A., Duchène Ph., Gorini D. (1995). *A study of activated sludge dewatering in experimental reed-planted or unplanted sludge drying beds*. Water Science and Tech., 32 (3), 251-261.

Mandi L. (1996). *The use of aquatic macrophytes in the treatment of wastewater under arid climate: Marrakech experiment*. Proceedings of 5th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Vienna, Austria, September 1996.

Martí E. (2003). *The Recycling Effect in the Nitrification-Denitrification Process in Vertical Flow Constructed Wetlands*. ETSECCPB dissertation, Technical University of Catalonia, 120 pp.

Masi F., Bendoricchio G., Conte G., Garuti G., Innocenti A., Franco D., Pietrelli L., Pineschi G., Pucci B., Romagnoli F. (2000). *Constructed wetlands for wastewater treatment in Italy: State-of-the-art and obtained results*. Conference Proceedings of the IWA 7th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Orlando, 979-985.

Masi F., Martinuzzi N. (2007). *Constructed Wetlands for the Mediterranean countries: hybrid systems for water reuse and sustainable sanitation*. Desalination, Vol. 215, pp. 44-55.

Masi F., Martinuzzi N. (2007). *Constructed wetlands for the Mediterranean countries: Hybrid systems for water reuse and sustainable sanitation*. Desalination 215 (1-3): 44-55.

Matamoros V., García J., Bayona J.M. (2005). *Behavior of selected pharmaceuticals in subsurface flow constructed wetlands. A pilot scale study*. Environmental Science and Technology 39, 5449-5454.

Matos J., Santos S., Dias S. (2002). *Small wastewater systems in Portugal: challenges, strategies and trends for the future*. International Congress Wastewater Treatment in Small Communities, Seville (Spain), March 20-22, 2002.

Metcalf T., Eddy. (1991). *Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse*. Tchobanoglous & Burton (eds.), Third Edition, McGraw-Hill, New York.

Molle P., Lienard A., Boutin C., Merlin G., Iwema A. (2004). *How to treat raw sewage with CW: an overview of the French Systems*. Proceedings, 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Avignon, France, 26-30 of September 2004, 21-30.

Molle P., Lienard A., Boutin C., Merlin G., Iwema A., (2005). *How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems*. Wat. Sci. Tech. 51, 11-21.

Molle P., Lienard A., Grasmick A., Iwema A. (2006). *Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behaviour of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads*. Water Res. 40, 606-612.

Moshiri GA. (1993). *Constructed wetlands for water quality improvement*. Florida, USA: Lewis publishers.

NAVFAC. (1986). *Soil Mechanics. Design Manual 7.01*. Naval Facilities Engineering Command. Alexandria, Virginia, USA, 389 pp.

Neely RK., Baker JL. (1989). *Nitrogen and phosphorus dynamics and the fate of agricultura runoff*. Northern Prairie Wetlands. A.G. Van der Valk (ed.): 92-131. Iowa State University Press, IA, USA.

Nivala J., Hoos MB., Cross C., Wallace S., Parkin G. (2007). *Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland*. Science of the Total Environment 380 (1-3): 19-27.

Ottová V., Balcarová J., Vymazal J. (1997). *Microbial Characteristics of Constructed Wetlands*. Water Science and Tech. 35 (5): 117-123.

Paing J., Voisin J. (2004). *Vertical Flow CW for municipal wastewater and septage treatment in French*. Proceedings, 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Avignon, France, 26-30 of September 2004, 315-324.

Papadopoulos A. (2002). *The Nagref experimental station in the Thessaloniki Greece*. International Congress Wastewater Treatment in Small Communities, Seville (Spain), March 20-22, 2002.

Pedescoll A., Granés F., García D., Ramírez G., García J. (2009) *Nivel de colmatación en dos humedales contruidos de flujo subsuperficial a gran escala*. Tecnología del Agua, 307 pp. 34-40.

Pedescoll A., Uggetti E., Llorens E., Pigagut J., García J., García D., Granés F. (2007). *Linking indirect measures to clogging phenomena in full-scale subsurface flow constructed wetlands*. 2nd International Congress Wastewater Treatment in Small Communities, Seville (Spain), November 11-15 2007.

Puigagut J., Llorens E., García J. (2007). *Anaerobic and aerobic biodegradability of the solids accumulated in a full-scale subsurface flow constructed wetland*. 2nd International Congress Wastewater Treatment in Small Communities, Seville (Spain), November 11-15, 2007.

Ragusa SR., McNevin D., Qasem S., Mitchell C. (2004). *Indicators of biofilm development and activity in constructed wetland microcosms*. Water Research 38: 2865-2873.

Reddy KR., D'Angello EM. (1994). *Soil process regulating water quality in wetlands*. Global Wetlands: Old World and New. W.J. Mitsch (ed.): 309-324. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

Reed SC., Crites RW., Middlebrooks EJ. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment. 2nd Edition*. McGraw-Hill, New York, 431 pp.

Rivera F., Warren A., Ramírez E., Decamp O., Bonilla P., Gallegos E., Calderón A., Sánchez JT. (1995). *Removal of pathogens from wastewater by the root zone method (RZM)*. Water Science and Tech. 32 (3): 211-218.

Robusté J. (2004). *Humedales construidos en explotación, experiencia en Cataluña. Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos*. Ediciones CPET. Centro de Publicaciones de Campus Nord. Barcelona, pp.89-92.

Rousseau DPL., Vanrolleghem PA., De Pauw N. (2004). *Constructed wetlands in Flanders: a performance analysis*. Ecol. Engineering. 23 (3), 151-163.

Salas JJ., Pidre JR., Sánchez L. (2007). *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. Capítulo IV: Humedales Artificiales*. Ed. CENTA. ISBN 13: 978-84-611-6885-9. Sevilla

Schierup HH., Brix H., Lorenzen B. (1990). *Wastewater treatment in constructed reed beds in Denmark - state of the art*. Constructed Wetlands in Water Pollution Control, P.F. Cooper & B.C. Findlater, eds. Pergamon Press, Oxford, pp. 495-504.

Seidel K. (1964). *Abbau von bacterium coli durch höhere wasserpflanzen*. Naturwiss. 51, 395-395.

Seidel K. (1996). *Reinigung von Gewässern durch höhere Pflanzen*. Naturwiss. 53, 289-297.

Shalabi M., (2004). *CW in Croatian Adriatic Area*. Proceedings, 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Avignon, France, 26-30 of September 2004, 307-314.

Sirivedhin T., Gray KA. (2006). *Factors affecting desnitrification rates in experimental wetlands: Field and laboratory studies*. Ecological Engineering 26 (2): 167-181.

Soto F., García M., Bécares E. (2000). *Seasonel differences in removal efficiencies using Scirpus lacustris for wastewater treatment*. 7th International conference on Wetland system for Water Pollution Control. Florida.

Suliman F., French H., Haugen LE., Klove B., Jenssen, P. (2005). *The effect of the scale of horizontal subsurface flow constructed wetlands on flow and transport parameters*. Wat. Sci. Technol. 51, 259-266.

Tanner CC. (1994). *Treatment of Dairy Farm Wastewater in Horizontal and up-flow Gravel-Bed Constructed Wetlands*. Water Science and Techonology 29 (4): 85-93.

Tanner CC., Clayton JS., Upsdell MP. (1995). *Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewater in constructed wetlands. Removal of oxygen demand, suspend solids and faecal coliforms*. Water Res., 29, 17-26.

Tanner CC., Sukias JP. (1995). *Accumulation of organic solids in gravel bed constructed wetlands*. Water Sci. Technol. 229-239.

Tanner CC., Sukias JPS., Upsdell MP. (1998). *Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters*. Water Research 32(10), 3046-3054.

Tanner CC., Sukias JPS., Upsdell MP. (1998). *Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetland treating farm dairy wastewater*. Water Res., 32, 3046-3054.

Toet S., Van Logtestijn RSP., Schreijer M., Kampf R., Verhoeven TA. (2005). *The functioning of wetland system used for polishing effluent from a sewage treatment plant*. Ecology Eng. 25, 101-124.

USEPA (United States Enviromental Protection Agency). (2000). *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA/625/R-99/010. USEPA Office of Research and Development, Cincinnati, OH.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). (1993). *Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. A Technology Assessment. EPA/832/R-93/008*. USEPA Office of Research and Development, Cincinnati, OH.

Vandevivre P., Baveye P. (1992). *Saturated hydraulic conductivity reduction caused by aerobic bacteria in sand columns*. Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 1-13.

Vera L., Martel G., Salas JJ., Sardón N., Nogueira R., Brito AG., Faby JA., Ramón A., (2007). *Depurant project, sustainable management of wastewater in rural areas*. 2nd International Congress Wastewater Treatment in Small Communities, Seville (Spain), November 11-15 2007.

Vymazal J. (2007). *Removal of nutrients in various types of constructed wetlands*. Science of the Total Environment 380 (1-3): 48-65.

Vymazal J., (2007). *Constructed wetlands with horizontal subsurface flow in the Czech Republic: Two long-term case studies*. 2nd International Congress Wastewater Treatment in Small Communities, Seville (Spain), November 11-15 2007.

Vymazal J., Brix H., Cooper PF., Green MB., Haberl R. (1998). *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Backhuys publ. Leiden. The Netherlands.

Vymazal J., Brix H., Cooper PF., Harbel R. (1998). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe*. Backhuys Publishers, Leiden. 366 pp.

Vymazal J., Kröpfelová L. (2008). *Wasterwater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow*. Editorial Board. Enviromental Pollution, vol. 14.

Vymazal J., Masa M. (2003). *Horizontal sub-surface flow constructed wetland with pulsing water level*. Water Sci. Technology, 48 (5), 143-148.

Watson J. Reed S., Kadleck R., Knight R., Whitehouse A. (1989). *Performance Expectations and Loadings Rates for Constructed Wetlands*. Hammer (ed.). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. pp. 319-351. Lewis Publisher, Chelsea, MI.

Williams J., Bahgat M., May e., Ford M., Butler J. (1995). *Mineralisation and pathogen removal in gravel bed hydroponic constructed wetlands for wastewater treatment*. *Water Science and Tech.* 32 (3): 49-58.

Winter KJ., Goetz D. (2003). *The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands*. *Water Science and Tech.* 48 (5): 9-14.

Yildiz C., Korkusuz A. E., Arikan Y., Demirer G.N., (2004). *CW for municipal wastewater treatment: a study from Turkey*. *Proceedings, 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Avignon, France, 26-30 of September 2004*, 193-202.

Younger PL., Banwart SA., Hedin R. (2002). *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation*. Kluwer Academics Publishers: London, United Kingdom.

Zhao YQ., Sun G., Allen SJ. (2004). *Anti-sized reed bed system for animal wastewater treatment: a comparative study*. *Water Research* 38: 2907-2917.

ANEXOS

ANEXO I: DATOS METEOROLÓGICOS

Los valores mensuales de: temperaturas máximas y mínimas, medias de las máximas y de las mínimas, media de las medias, precipitación y evaporación, en el período de investigación, se recogen en la Tabla 91, Tabla 92, Tabla 93 y Tabla 94. También se representa en distintas figuras la evolución de los distintos parámetros a lo largo del período de estudio.

Como se observa en la tabla adjunta los valores meteorológicos que se dan en la zona del estudio son típicos de Andalucía, con una temperatura media durante el período de 17,4° C. La media de las máximas es de 30,5 ° y de las mínimas es de 5,6 °C. Ha llegado a haber temperaturas mínimas de -3,2° C y máximas de 41,9 °C. La media mensual de la evaporación en el periodo ha sido de 128,9 mm, y la de la precipitación de 46,6 mm. La suma total de precipitación ha sido de 806,3 mm en 2006; 383,5 mm en 2007; 583,3 mm en 2008 y 230, 6 mm de enero a julio de 2009.

Pese a estas varianzas, tal como se ha comentado en apartados anteriores, el sistema no se ha visto afectado en su funcionamiento diario. Lo cual corrobora una vez más la robustez de la tecnología en estudio.

Tabla 91. Datos meteorológicos, año 2006

2006	Temp Max (°C)	Temp Min (°C)	Media Max (°C)	Media Min (°C)	Temp Media (°C)	Evaporación (mm)	Precipitación (mm)
Enero	17,4	-0,5	14,3	4,5	9,4	40,3	126,9
Febrero	21,7	0,5	15,8	4,4	10,1	55,1	67,0
Marzo	26,2	1,5	19,6	7,6	13,6	68,1	90,0
Abril	29,0	7,4	23,4	10,6	17,0	89,5	74,5
Mayo	36,8	8,4	28,7	13,0	20,9	197,0	3,8
Junio	38,7	11,6	31,6	15,2	23,4	181,2	28,5
Julio	41,9	12,4	36,6	16,7	26,7	268,9	0,0
Agosto	39,3	13,5	35,1	17,8	26,4	192,1	17,1
Septiembre	41,0	11,2	31,9	15,6	23,7	158,7	32,7
Octubre	30,4	10,5	25,5	14,4	20,0	102,1	211,1
Noviembre	25,6	4,0	20,0	11,2	15,6	49,9	127,5
Diciembre	19,6	-1,2	15,2	4,8	9,9	55,9	27,2

Tabla 92. Datos meteorológicos, año 2007

2007	Temp Max (°C)	Temp Min (°C)	Media Max (°C)	Media Min (°C)	Temp Media (°C)	Evaporación (mm)	Precipitación (mm)
Enero	20,4	-1,0	16,3	3,4	9,8	51,6	45,2
Febrero	21,9	3,4	17,5	8,0	12,7	49,1	66,9
Marzo	23,9	1,0	20,1	6,0	13,0	128,3	17,1
Abril	28,9	1,0	21,6	8,7	15,2	97,7	19,1
Mayo	35,0	1,0	26,3	10,3	18,3	163,0	50,0
Junio	36,5	9,0	30,1	13,0	21,5	174,9	3,0
Julio	41,2	11,8	36,0	15,2	25,6	256,3	0,0
Agosto	40,6	11,5	33,6	15,8	24,7	193,2	57,1
Septiembre	35,7	12,1	29,7	16,3	23,0	124,4	22,6
Octubre	30,5	7,4	26,0	12,1	19,0	109,5	23,7
Noviembre	26,2	3,7	20,6	7,1	13,9	100,2	62,0
Diciembre	20,0	-1,1	16,6	4,9	10,7	49,9	16,8

Tabla 93. Datos meteorológicos, año 2008

2008	Temp Max (°C)	Temp Min (°C)	Media Max (°C)	Media Min (°C)	Temp Media (°C)	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)
Enero	21,4	1,3	17,4	5,3	11,4	51,2	59,4
Febrero	23,3	1,0	19,3	8,0	13,7	65,7	71,7
Marzo	26,5	0,0	21,3	5,8	13,6	106,4	21,1
Abril	31,9	5,0	23,2	9,4	16,3	118,1	174,9
Mayo	30,7	7,7	24,0	10,7	17,3	118,8	36,8
Junio	40,5	10,8	32,9	14,3	23,6	218,2	0,0
Julio	38,9	11,5	35,3	15,8	25,5	244,2	2,1
Agosto	38,9	11,2	35,7	15,4	25,5	240,0	0,0
Septiembre	34,9	11,4	29,0	14,9	22,0	127,0	61,7
Octubre	28,1	3,9	24,2	13,0	18,6	94,6	85,9
Noviembre	22,8	5,0	18,4	6,3	12,3	87,0	11,5
Diciembre	17,1	-1,0	4,9	3,7	4,3	38,2	58,2

Tabla 94. Datos meteorológicos, año 2009

2009	Temp Max (°C)	Temp Min (°C)	Media Max (°C)	Media Min (°C)	Temp Media (°C)	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)
Enero	18,4	-3,2	14,0	4,2	9,1	39,4	87,1
Febrero	21,9	2,0	17,3	4,8	11,1	56,9	78,3
Marzo	26,9	3,6	21,6	8,2	14,9	103,4	31,4
Abril	30,4	3,2	22,5	6,2	14,3	118,6	28,8
Mayo	34,9	5,2	28,6	10,0	19,3	211,0	2,1
Junio	40,5	8,4	32,8	15,2	24,0	231,3	2,9
Julio	41,0	13,0	36,9	17,0	27,0	317,9	0,0
Agosto	40,2	12,3	37,0	17,0	27,0	265,6	0,0

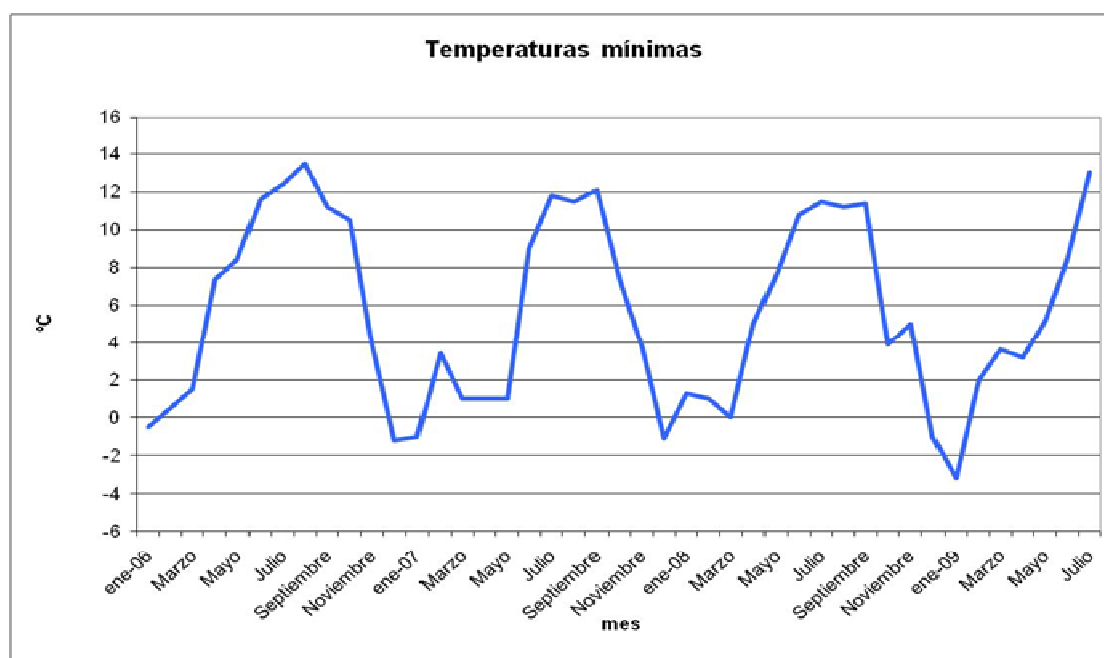


Figura 108. Valores de temperatura mínima a lo largo del estudio

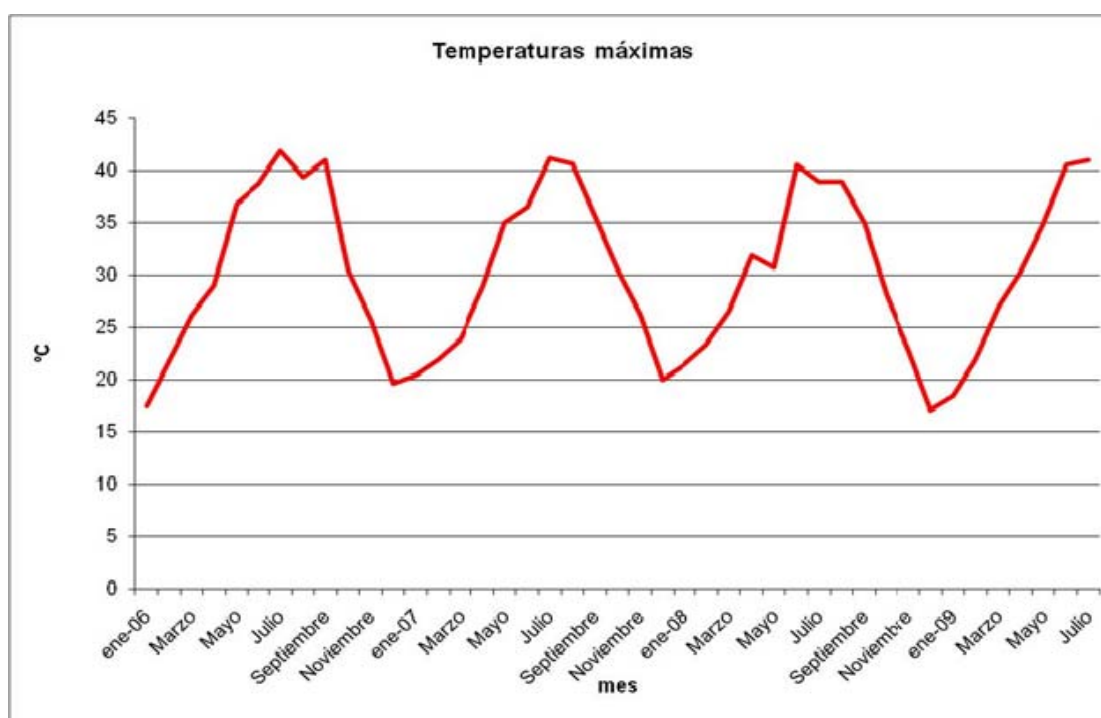


Figura 109. Valores de temperatura máxima a lo largo del estudio

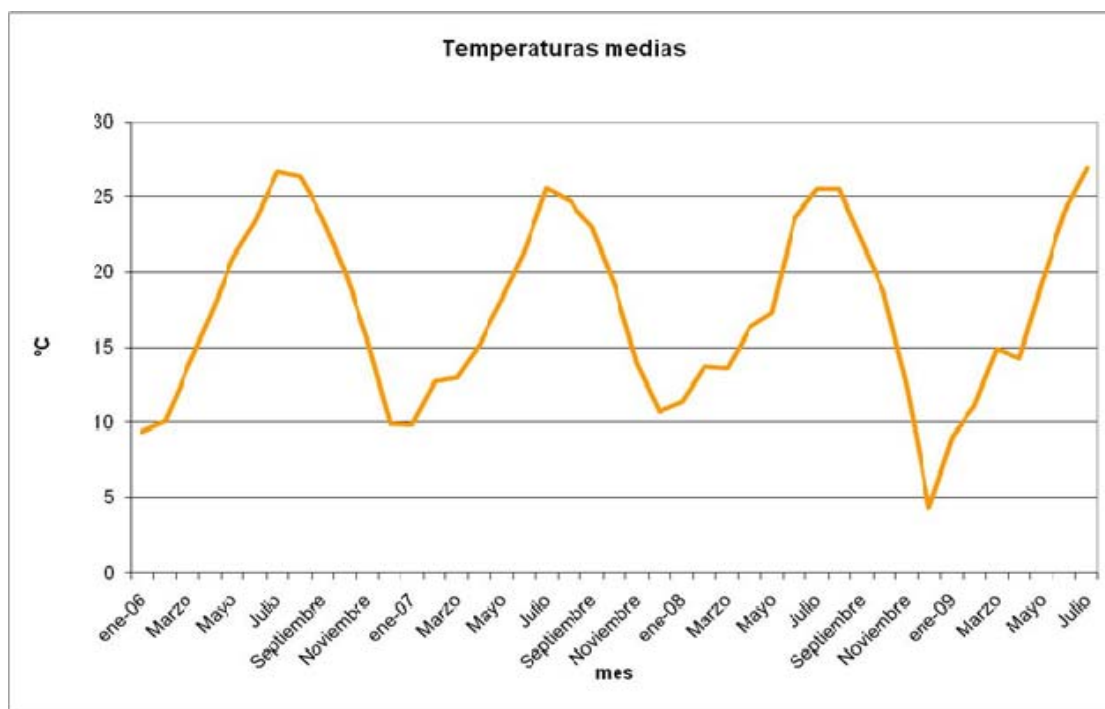


Figura 110. Valores de temperatura media a lo largo del estudio

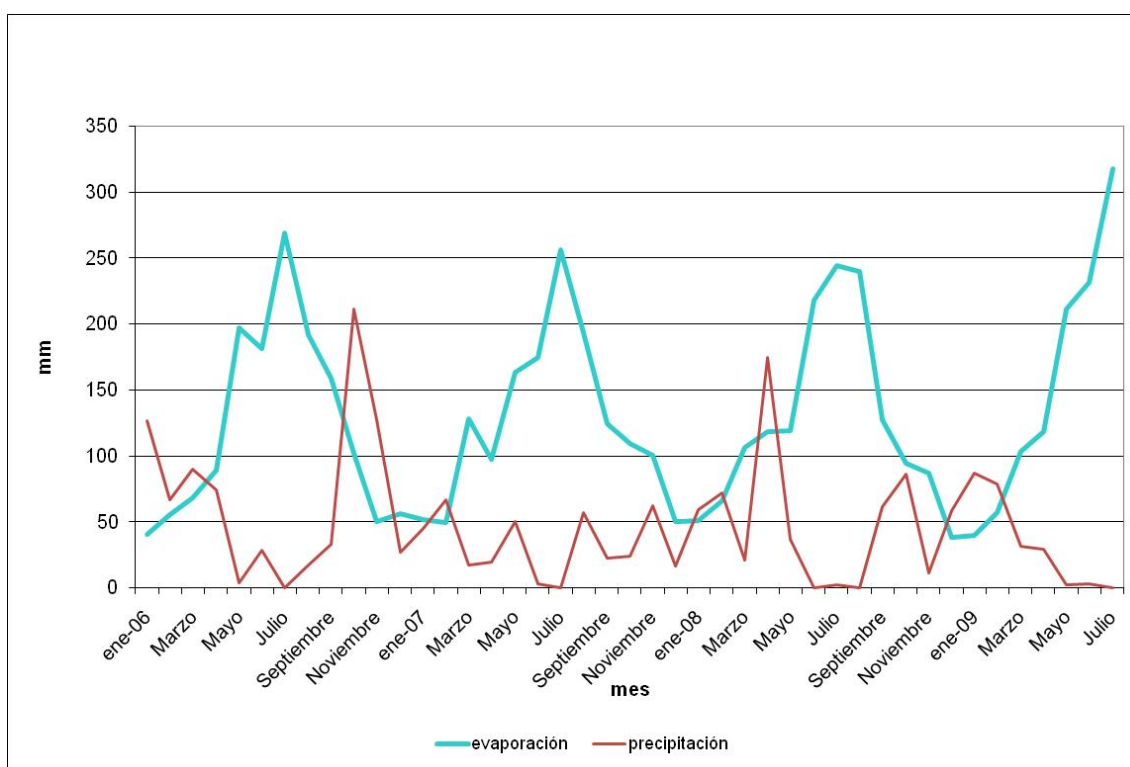


Figura 111. Valores de evaporación y precipitación a lo largo del estudio

ANEXO II: RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se adjuntan las tablas con todos los datos analíticos obtenidos durante la investigación en los distintos puntos de muestreo. Las abreviaturas que se indican corresponden con los siguientes parámetros:

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno, medida en mg/l

DQO: Demanda Química de Oxígeno, medida en mg/l

SST: Sólidos en Suspensión Totales, medidos en mg/l

NT: Nitrógeno Total, medido en mg/l

PT: Fósforo Total, medido en mg/l

Los puntos de muestreo se indican con las siguientes abreviaturas:

INF: influente

TI: tanque Imhoff

H1: Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical (HV1)

H2: Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal (HH2)

H3: Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical (HV3)

H5: Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal (HH5)

H6: Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal (HH6)

H4: Humedal Artificial de Flujo Superficial (H4)

Tabla 95. Valores de concentración en el influente en el año 2006

FECHA	DBOINF	DQOINF	SSTINF	NTINF	PTINF
07/06/2006	460	1117	292	64,0	14,5
13/06/2006	520	1014	316	74,0	16,8
28/06/2006	400	920	256	69,0	14,7
05/07/2006	420	1000	224	66,3	13,41
11/07/2006	400	901	260	66,4	14,1
18/07/2006	400	1028	256	61,9	12,7
26/07/2006	500	891	412	65,9	13,4
01/08/2006	400	985	260	63,1	12,4
08/08/2006	380	807	276	67,6	10,9
16/08/2006	460	842	400	66,0	12,7
22/08/2006	420	854	244	60,3	18,9
29/08/2006	460	838	284	66,9	12,4
05/09/2006	420	842	304	84,5	13,9
12/09/2006	440	974	244	66,0	14,3
19/09/2006	750	1490	428	68,3	16,2
27/09/2006	650	1203	344	136,6	20,2
03/10/2006	580	1010	336	86,5	15,6
11/10/2006	580	1087	296	115,7	22,9
31/10/2006	220	645	396	49,1	10,2
06/11/2006	160	380	96	69,8	7,9
14/11/2006	210	395	188	-	8,6
21/11/2006	200	366	168	-	7,3
28/11/2006	200	450	212	-	5,0
05/12/2006	120	300	132	-	-
12/12/2006	130	299	108	41,2	4,6
19/12/2006	160	380	132	-	8,7

Tabla 96. Valores de concentración en el influente en el año 2007

FECHA	DBOINF	DQOINF	SSTINF	NTINF	PTINF
03/01/2007	260	495	250	-	7,4
09/01/2007	600	813	504	-	14,6
16/01/2007	340	637	360	-	9,5
24/01/2007	260	555	252	63,9	9,7
30/01/2007	170	402	114	77,1	6,6
07/02/2007	300	670	264	54,2	9,0
13/02/2007	140	317	132	59,9	7,0
21/02/2007	130	265	108	42,4	4,0
27/02/2007	200	490	174	61,5	6,7
07/03/2007	200	364	200	53,3	7,5
13/03/2007	320	590	260	51,0	8,5
20/03/2007	260	466	164	55,6	7,5
27/03/2007	210	409	196	36,5	5,3
10/04/2007	320	558	280	49,0	8,6
17/04/2007	700	1171	860	64,5	13,8
24/04/2007	390	686	224	41,0	9,7
08/05/2007	360	554	212	50,2	9,6
15/05/2007	450	757	308	62,0	12,5
22/05/2007	350	739	264	61,0	11,1
29/05/2007	450	966	232	63,0	13,2
05/06/2007	550	908	356	-	-
12/06/2007	450	1077	614	103,0	16,5
20/06/2007	300	721	300	-	-
26/06/2007	500	1025	352	71,4	14,8
03/07/2007	380	872	384	53,0	10,5
17/07/2007	480	1077	508	76,3	12,9
24/07/2007	373	777	104	51,1	9,6
01/08/2007	420	1212	548	88,2	19,5
07/08/2007	420	1021	294	71,4	13,6
21/08/2007	380	898	340	61,6	11,3
28/08/2007	240	818	212	51,8	10,7
04/09/2007	400	1053	396	65,8	13,1
11/09/2007	500	1026	364	74,9	15,4
18/09/2007	550	1073	276	70,0	14,8
25/09/2007	420	997	244	67,9	14,6
02/10/2007	500	1010	380	105,7	17,5
09/10/2007	600	1019	276	81,2	13,6
16/10/2007	550	1011	232	69,3	12,6
23/10/2007	541	1127	280	72,1	13,3
30/10/2007	390	813	228	106,0	11,8
06/11/2007	515	1073	332	80,0	13,0
27/11/2007	550	1146	136	83,3	11,3
04/12/2007	450	1085	344	-	-
11/12/2007	500	1000	260	79,1	13,7

Tabla 97. Valores de concentración en el influente en el año 2008

FECHA	DBOINF	DQOINF	SSTINF	NTINF	PTINF
16/01/2008	410	870	168	73,3	10,5
22/01/2008	430	855	274	77,8	12,0
29/01/2008	510	1138	216	74,4	12,5
05/02/2008	400	872	212	61,6	11,4
12/02/2008	480	1055	252	81,0	14,8
26/02/2008	315	539	184	56,3	11,9
04/03/2008	360	580	192	65,4	11,2
11/03/2008	380	684	208	65,7	12,2
25/03/2008	360	715	190	61,6	13,0
01/04/2008	400	625	256	67,9	12,3
15/04/2008	110	266	134	38,3	5,8
22/04/2008	105	208	96	60,0	5,7
29/04/2008	250	466	244	44,8	7,9
06/05/2008	260	609	224	42,0	7,7
13/05/2008	290	449	176	56,0	8,5
20/05/2008	320	533	222	53,9	9,2
27/05/2008	310	518	194	51,4	9,4
03/06/2008	250	369	256	46,2	7,4
10/06/2008	440	869	308	56,0	10,7
17/06/2008	520	855	416	70,7	12,8
24/06/2008	440	646	284	59,5	10,7
01/07/2008	380	682	368	53,2	10,7
08/07/2008	480	1141	232	60,2	9,8
17/07/2008	440	582	256	64,4	10,1
22/07/2008	500	610	272	64,7	10,2
30/07/2008	340	661	320	63,0	11,9
05/08/2008	320	557	116	68,6	9,6
19/08/2008	340	587	174	65,1	10,6
09/09/2008	290	574	98	63,2	8,8
16/09/2008	600	805	276	73,5	12,6
24/09/2008	440	634	240	75,0	9,8
30/09/2008	420	625	218	64,0	9,6
07/10/2008	520	730	280	81,0	11,0
16/10/2008	400	598	142	72,1	9,8
28/10/2008	440	873	272	58,8	8,3
04/11/2008	420	647	208	-	9,4
11/11/2008	440	634	178	-	9,7
25/11/2008	480	959	236	-	9,6
16/12/2008	440	721	234	-	12,8

Tabla 98. Valores de concentración en el influente en el año 2009

FECHA	DBOINF	DQOINF	SSTINF	NTINF	PTINF
14/01/2009	240	326	170	-	-
20/01/2009	280	663	356	-	-
27/01/2009	270	442	114	-	-
25/02/2009	456	670	228	-	-
10/03/2009	206	360	268	-	-
17/03/2009	330	477	224	-	-
24/03/2009	220	329	124	-	-
31/03/2009	400	586	332	-	-
14/04/2009	280	484	134	-	-
21/04/2009	175	597	252	-	-
05/05/2009	286	652	340	-	-
19/05/2009	281	659	304	-	-
26/05/2009	310	549	368	-	-
02/06/2009	241	552	236	-	-
09/06/2009	450	717	248	-	-
16/06/2009	660	906	424	-	-
23/06/2009	440	694	1920	-	-
22/07/2009	377	686	513	-	-

Tabla 99. Valores de concentración en la salida del tanque Imhoff en el año 2006

FECHA	DBOSALT I	DQOSALT I	SSTSALT I	NTSALT I	PTSALT I
07/06/2006	360	654	156	-	-
13/06/2006	360	795	140	73,0	14,7
28/06/2006	320	584	120	69,0	13,2
05/07/2006	300	644	148	-	-
11/07/2006	260	567	128	67,0	14,5
18/07/2006	280	563	128	-	-
26/07/2006	300	553	136	60,2	11,9
01/08/2006	260	612	116	-	-
08/08/2006	260	635	174	66,3	10,2
16/08/2006	310	573	154	-	-
22/08/2006	315	680	182	65,2	14,5
29/08/2006	300	596	120	-	-
05/09/2006	300	720	206	-	13,2
12/09/2006	360	609	136	-	-
19/09/2006	440	1043	124	67,2	13,7
27/09/2006	320	680	114	-	-
03/10/2006	400	708	150	71,2	13,4
11/10/2006	440	613	138	-	-
31/10/2006	125	281	82	34,0	6,9
06/11/2006	65	196	41	26,3	4,8
14/11/2006	120	288	90	-	6,3
21/11/2006	80	233	76	4,5	4,5
28/11/2006	50	194	76	2,4	3,0
05/12/2006	50	206	109	-	-
12/12/2006	40	186	32	37,9	2,6
19/12/2006	55	225	54	10,0	3,9

Tabla 100. Valores de concentración en la salida del tanque Imhoff en el año 2007

FECHA	DBOSALTI	DQOSALTI	SSTSALTI	NTSALTI	PTSALTI
03/01/2007	145	326	80	-	-
09/01/2007	140	289	114	-	6,9
16/01/2007	120	299	108	-	5,3
24/01/2007	180	431	84	42,0	7,4
30/01/2007	55	184	62	34,1	2,5
07/02/2007	80	226	70	-	-
13/02/2007	52	94	50	-	-
21/02/2007	60	204	21	36,8	3,0
27/02/2007	63	262	50	50,6	4,0
07/03/2007	75	331	172	80,6	4,8
13/03/2007	170	332	117	-	-
20/03/2007	150	363	142	34,0	5,7
27/03/2007	93	222	72	32,0	3,5
10/04/2007	200	380	102	42,1	6,7
17/04/2007	320	566	130	51,0	8,6
24/04/2007	310	555	130	-	-
08/05/2007	230	343	124	46,0	7,9
15/05/2007	380	549	142	67,0	11,3
22/05/2007	200	611	154	65,0	11,5
29/05/2007	340	582	136	65,0	11,9
05/06/2007	360	612	168	-	-
12/06/2007	340	642	188	84,7	12,9
20/06/2007	160	351	128	-	-
26/06/2007	280	465	206	69,3	12,3
03/07/2007	340	528	156	69,0	10,6
17/07/2007	240	469	145	67,2	10,6
24/07/2007	280	544	102	-	-
01/08/2007	300	668	114	-	-
07/08/2007	320	632	108	-	12,1
21/08/2007	230	476	110	62,3	10,8
28/08/2007	170	450	96	49,7	8,4
04/09/2007	240	554	122	-	-
11/09/2007	280	550	122	69,3	11,7
18/09/2007	360	708	116	-	-
25/09/2007	340	554	122	67,2	12,3
02/10/2007	280	533	114	-	-
09/10/2007	460	647	146	71,4	12,5
16/10/2007	400	626	110	-	-
23/10/2007	309	617	120	72,1	12,0
30/10/2007	320	497	128	-	-
06/11/2007	343	687	126	88,0	12,6
27/11/2007	320	784	134	74,9	10,9
04/12/2007	285	569	130	-	-
11/12/2007	360	650	128	79,1	12,8

Tabla 101. Valores de concentración en la salida del tanque Imhoff en el año 2008

FECHA	DBOSALTI	DQOSALTI	SSTSALTI	NTSALTI	PTSALTI
16/01/2008	270	462	108	-	-
22/01/2008	300	516	88	68,7	9,3
29/01/2008	280	645	244	-	-
05/02/2008	280	544	102	71,4	10,6
12/02/2008	180	662	124	-	-
26/02/2008	346	346	82	-	-
04/03/2008	250	398	110	66,0	11,1
11/03/2008	280	496	108	-	-
25/03/2008	230	502	110	56,0	10,6
01/04/2008	300	446	150	-	-
15/04/2008	60	174	52	44,3	4,1
22/04/2008	60	164	40	-	-
29/04/2008	100	210	82	37,4	6,1
06/05/2008	180	272	98	-	-
13/05/2008	180	313	118	55,3	7,9
20/05/2008	170	274	80	-	-
27/05/2008	170	257	80	40,6	6,6
03/06/2008	210	340	102	-	-
10/06/2008	240	447	102	60,9	9,1
17/06/2008	340	592	162	-	-
24/06/2008	300	466	132	61,0	9,6
01/07/2008	370	433	158	-	-
08/07/2008	300	441	130	58,1	9,1
17/07/2008	320	504	136	-	-
22/07/2008	200	474	120	68,2	9,3
30/07/2008	360	631	152	-	-
05/08/2008	270	462	120	86,8	9,5
19/08/2008	290	488	142	67,0	10,2
09/09/2008	270	425	108	-	-
16/09/2008	300	508	173	74,2	10,7
24/09/2008	270	423	132	-	-
30/09/2008	207	369	74	54,1	6,9
07/10/2008	400	549	124	-	-
16/10/2008	280	456	94	65,1	7,3
28/10/2008	250	472	90	44,1	6,6
04/11/2008	278	497	120	-	-
11/11/2008	320	535	130	-	9,5
25/11/2008	330	455	120	-	9,3
16/12/2008	283	505	112	-	9,1

Tabla 102. Valores de concentración en la salida del tanque Imhoff en el año 2009

FECHA	DBOSALT	DQOSALT	SSTSALT	NTSALT	PTSALT
14/01/2009	198	395	106	-	-
20/01/2009	260	447	110	-	-
27/01/2009	210	355	86	-	-
25/02/2009	342	503	78	-	-
10/03/2009	155	270	91	-	-
17/03/2009	210	313	118	-	-
24/03/2009	93	259	96	-	-
31/03/2009	183	486	154	-	-
14/04/2009	256	480	150	-	-
21/04/2009	156	665	158	-	-
05/05/2009	144	494	162	-	-
19/05/2009	186	449	134	-	-
26/05/2009	218	402	104	-	-
02/06/2009	237	382	118	-	-
09/06/2009	290	492	148	-	-
16/06/2009	290	466	130	-	-
23/06/2009	190	323	94	-	-
22/07/2009	183	398	92	-	-

Tabla 103. Valores de concentración en la salida del HV1 en el año 2006

FECHA	DBOSALH1	DQOSALH1	SSTSALH1	NTSALH1	PTSALH1
07/06/2006	60	151	68	-	-
13/06/2006	100	255	92	40,0	10,8
28/06/2006	70	175	42	38,0	11,0
05/07/2006	70	209	33	-	-
11/07/2006	55	177	30	33,1	10,3
18/07/2006	45	169	36	-	-
26/07/2006	45	150	40	27,7	9,3
01/08/2006	20	105	20	-	-
08/08/2006	17	72	33	25,9	8,6
16/08/2006	21	36	12	-	-
22/08/2006	22	148	69	19,3	9,2
29/08/2006	25	139	31	-	-
05/09/2006	14	91	58	5,8	10,0
12/09/2006	30	122	17	-	-
19/09/2006	55	179	28	27,6	13,1
27/09/2006	24	77	14	-	-
03/10/2006	50	114	29	28,6	12,4
11/10/2006	55	179	28	-	-
31/10/2006	22	14	14	23,8	5,4
06/11/2006	12	40	9	12,9	3,7
14/11/2006	20	70	21	9,2	6,1
21/11/2006	10	38	11	14,5	4,4
28/11/2006	4	30	10	26,4	2,6
05/12/2006	4	42	16	-	-
12/12/2006	4	47	6	21,9	2,9
19/12/2006	6	58	9	20,1	3,9

Tabla 104. Valores de concentración en la salida del HV1 en el año 2007

FECHA	DBOSALH1	DQOSALH1	SSTSALH1	NTSALH1	PTSALH1
03/01/2007	32	96	24	-	-
09/01/2007	48	99	52	-	7,4
16/01/2007	31	70	14	-	-
24/01/2007	10	61	5	23,2	5,3
30/01/2007	4	32	12	4,0	3,5
07/02/2007	7	58	4	-	3,6
13/02/2007	6	43	4	-	-
21/02/2007	6	30	5	43,9	-
27/02/2007	7	77	13	58,2	4,1
07/03/2007	8	30	4	23,1	5,0
13/03/2007	32	81	16	6,5	4,7
20/03/2007	30	91	19	24,4	-
27/03/2007	22	90	65	22,2	6,6
10/04/2007	34	90	22	17,1	6,5
17/04/2007	30	123	32	21,0	8,7
24/04/2007	25	113	7	-	7,1
08/05/2007	18	88	16	22,2	-
15/05/2007	45	124	38	25,3	7,1
22/05/2007	35	115	25	21,7	10,5
29/05/2007	45	182	38	32,1	12,1
05/06/2007	65	121	36	-	8,7
12/06/2007	50	237	14	39,5	-
20/06/2007	15	139	11	-	11,1
26/06/2007	35	244	22	28,3	-
03/07/2007	20	83	17	25,0	11,7
17/07/2007	14	81	11	34,6	7,5
24/07/2007	10	107	12	-	11,4
01/08/2007	28	118	18	-	-
07/08/2007	10	121	85	16,8	-
21/08/2007	10	44	23	24,6	13,8
28/08/2007	15	124	40	23,8	9,6
04/09/2007	14	63	18	-	5,6
11/09/2007	14	81	34	22,3	-
18/09/2007	17	102	21	-	10,9
25/09/2007	22	81	18	21,0	-
02/10/2007	23	91	46	-	13,0
09/10/2007	26	86	24	17,3	11,7
16/10/2007	60	129	60	-	-
23/10/2007	70	218	20	30,1	15,6
30/10/2007	66	95	36	-	-
06/11/2007	26	117	46	34,9	13,8
27/11/2007	60	129	40	37,4	9,3
04/12/2007	45	133	42	-	-
11/12/2007	55	163	57	32,2	11,0

Tabla 105. Valores de concentración en la salida del HV1 en el año 2008

FECHA	DBOSALH1	DQOSALH1	SSTSALH1	NTSALH1	PTSALH1
16/01/2008	36	99	43	-	-
22/01/2008	22	80	30	28,6	10,3
29/01/2008	25	118	42	-	-
05/02/2008	16	100	30	27,3	11,4
12/02/2008	95	128	36	-	-
26/02/2008	7	47	0	-	-
04/03/2008	15	73	13	19,4	9,0
11/03/2008	25	120	17	-	-
25/03/2008	20	69	7	14,3	9,6
01/04/2008	16	84	10	-	-
15/04/2008	6	33	0	18,7	2,9
22/04/2008	4	67	0	-	-
29/04/2008	12	48	8	19,4	4,0
06/05/2008	20	85	7	-	-
13/05/2008	11	52	9	15,7	5,8
20/05/2008	11	53	8	-	-
27/05/2008	13	44	8	11,2	6,7
03/06/2008	17	47	8	-	-
10/06/2008	34	102	32	22,4	10,4
17/06/2008	34	99	20	-	-
24/06/2008	38	100	22	19,6	11,2
01/07/2008	18	104	20	-	-
08/07/2008	22	34	11	16,1	10,0
17/07/2008	30	93	22	-	-
22/07/2008	28	80	7	18,6	9,6
30/07/2008	26	70	22	-	-
05/08/2008	40	108	31	25,3	9,4
19/08/2008	26	90	47	17,5	6,5
09/09/2008	9	54	5	-	-
16/09/2008	65	164	33	30,4	7,4
24/09/2008	28	91	21	-	-
30/09/2008	6	35	6	16,5	2,0
07/10/2008	18	60	11	-	-
16/10/2008	14	91	14	20,7	8,2
28/10/2008	30	71	14	23,0	7,7
04/11/2008	28	78	23	-	-
11/11/2008	40	122	23	-	10,9
25/11/2008	35	116	21	-	9,3
16/12/2008	28	106	17	-	7,0

Tabla 106. Valores de concentración en la salida del HV1 en el año 2009

FECHA	DBOSALH1	DQOSALH1	SSTSALH1	NTSALH1	PTSALH1
14/01/2009	55	184	20	-	-
20/01/2009	50	144	54	-	-
27/01/2009	30	92	6	-	-
25/02/2009	22	82	54	-	-
10/03/2009	20	78	36	-	-
17/03/2009	14	102	56	-	-
24/03/2009	17	99	26	-	-
31/03/2009	21	116	35	-	-
14/04/2009	72	199	25	-	-
21/04/2009	39	152	52	-	-
05/05/2009	25	135	38	-	-
19/05/2009	18	101	35	-	-
26/05/2009	19	85	19	-	-
02/06/2009	18	88	42	-	-
09/06/2009	24	87	16	-	-
16/06/2009	18	69	24	-	-
23/06/2009	14	74	9	-	-
22/07/2009	21	82	12	-	-

Tabla 107. Valores de concentración en la salida del HH2 en el año 2006

FECHA	DBOSALH2	DQOSALH2	SSTSALH2	NTSALH2	PTSALH2
07/06/2006	48	112	5	-	-
13/06/2006	44	108	9	60,0	10,2
28/06/2006	44	98	7	60,0	10,5
05/07/2006	45	123	6	-	-
11/07/2006	20	77	5	48,6	10,8
18/07/2006	45	132	3	-	-
26/07/2006	-	123	7	54,6	8,9
01/08/2006	25	89	8	55,0	7,9
08/08/2006	38	68	17	54,1	7,5
16/08/2006	60	112	10	-	-
22/08/2006	-	112	15	49,0	8,9
29/08/2006	42	111	9	-	-
05/09/2006	32	88	12	-	9,1
12/09/2006	54	114	9	-	-
19/09/2006	44	107	7	46,2	10,2
27/09/2006	46	125	8	-	-
03/10/2006	60	130	8	50,0	11,8
11/10/2006	75	126	10	57,0	12,0
31/10/2006	-	76	6	36,0	4,2
06/11/2006	41	79	6	27,0	8,0
14/11/2006	29	72	9	-	5,6
21/11/2006	42	70	10	-	5,2
28/11/2006	24	63	5	-	3,9
05/12/2006	17	42	15	-	-
12/12/2006	15	50	3	28,9	2,9
19/12/2006	15	42	4	3,7	3,5

Tabla 108. Valores de concentración en la salida del HH2 en el año 2007

FECHA	DBOSALH2	DQOSALH2	SSTSALH2	NTSALH2	PTSALH2
03/01/2007	45	117	10	-	-
09/01/2007	65	87	15	-	9,9
16/01/2007	75	140	25	-	-
24/01/2007	105	200	13	-	8,7
30/01/2007	34	115	8	35,0	9,8
07/02/2007	38	74	10	30,2	5,4
13/02/2007	13	44	10	-	-
21/02/2007	32	71	8	-	-
27/02/2007	38	92	6	23,4	5,8
07/03/2007	-	90	6	23,7	5,3
13/03/2007	80	157	5	25,3	6,9
20/03/2007	55	123	25	-	-
27/03/2007	85	184	13	33,0	7,9
10/04/2007	30	170	13	39,0	12,4
17/04/2007	105	206	12	41,0	9,8
24/04/2007	-	212	11	41,0	8,5
08/05/2007	80	131	14	-	-
15/05/2007	120	200	21	45,0	7,6
22/05/2007	50	202	24	50,0	9,2
29/05/2007	52	228	14	52,0	11,0
05/06/2007	70	182	17	58,0	12,1
12/06/2007	100	278	21	-	-
20/06/2007	45	166	14	57,4	10,4
26/06/2007	45	131	11	-	-
03/07/2007	38	107	11	53,2	10,2
17/07/2007	28	106	5	55,0	9,8
24/07/2007	40	118	3	51,8	11,0
01/08/2007	30	115	9	-	-
07/08/2007	40	118	5	-	-
21/08/2007	20	110	5	52,5	10,6
28/08/2007	20	96	11	50,0	9,7
04/09/2007	34	103	5	32,9	7,3
11/09/2007	35	110	8	-	-
18/09/2007	28	94	6	49,7	10,9
25/09/2007	44	103	5	-	-
02/10/2007	40	130	6	51,8	10,6
09/10/2007	50	116	8	51,8	10,3
16/10/2007	56	99	6	-	-
23/10/2007	65	145	10	56,0	11,0
30/10/2007	60	105	8	-	-
06/11/2007	10	123	7	71,0	11,8
27/11/2007	11	56	5	50,4	9,1
04/12/2007	55	127	10	-	-
11/12/2007	55	129	7	63,0	11,1

Tabla 109. Valores de concentración en la salida del HH2 en el año 2008

FECHA	DBOSALH2	DQOSALH2	SSTSALH2	NTSALH2	PTSALH2
16/01/2008	45	81	8	-	-
22/01/2008	75	126	9	-	-
29/01/2008	40	146	8	-	-
05/02/2008	42	134	17	72,2	11,9
12/02/2008	-	145	13	-	-
26/02/2008	27	76	5	46,0	7,2
04/03/2008	50	121	9	66,7	9,4
11/03/2008	55	131	10	-	-
25/03/2008	60	199	27	55,5	7,8
01/04/2008	25	209	52	-	-
15/04/2008	17	77	14	27,3	4,6
22/04/2008	9	52	6	18,9	1,2
29/04/2008	14	51	14	22,1	5,1
06/05/2008	14	44	6	-	-
13/05/2008	20	61	38	30,1	7,4
20/05/2008	28	80	13	-	-
27/05/2008	28	87	14	29,4	7,1
03/06/2008	33	89	18	-	-
10/06/2008	40	102	12	40,6	9,6
17/06/2008	26	98	19	-	-
24/06/2008	160	270	60	46,2	1,7
01/07/2008	50	129	28	-	-
08/07/2008	58	134	76	47,6	4,3
17/07/2008	50	122	48	-	-
22/07/2008	22	72	39	50,7	5,3
30/07/2008	22	64	27	-	-
05/08/2008	20	56	27	56,0	10,0
19/08/2008	14	53	8	49,6	8,3
09/09/2008	20	121	15	-	-
16/09/2008	28	82	10	48,3	11,2
24/09/2008	-	71	7	-	-
30/09/2008	23	65	12	34,8	11,8
07/10/2008	24	85	14	-	-
16/10/2008	70	195	5	55,3	8,3
28/10/2008	26	71	8	42,7	8,2
04/11/2008	4	96	14	-	-
11/11/2008	-	104	20	-	12,9
25/11/2008	50	134	12	-	10,2
16/12/2008	35	80	7	-	8,2

Tabla 110. Valores de concentración en la salida del HH2 en el año 2008

FECHA	DBOSALH2	DQOSALH2	SSTSALH2	NTSALH2	PTSALH2
14/01/2009	105	148	15	-	-
20/01/2009	100	190	10	-	-
27/01/2009	65	135	10	-	-
25/02/2009	-	216	18	-	-
10/03/2009	70	110	17	-	-
17/03/2009	80	165	13	-	-
24/03/2009	98	205	26	-	-
31/03/2009	82	181	12	-	-
14/04/2009	120	222	11	-	-
21/04/2009	47	184	10	-	-
05/05/2009	31	200	10	-	-
19/05/2009	24	133	9	-	-
26/05/2009	61	140	12	-	-
02/06/2009	25	97	9	-	-
09/06/2009	36	106	9	-	-
16/06/2009	45	113	9	-	-
23/06/2009	34	103	9	-	-
22/07/2009	-	81	9	-	-

Tabla 111. Valores de concentración en la salida del HV3 en el año 2006

FECHA	DBOSALH3	DQOSALH3	SSTSALH3	NTSALH3	PTSALH3
07/06/2006	12	33	7	-	-
13/06/2006	12	63	14	18,0	10,1
28/06/2006	8	47	8	16,0	11,7
05/07/2006	10	75	8	15,0	9,8
11/07/2006	4	44	1	9,0	10,2
18/07/2006	8	73	5	14,0	9,3
26/07/2006	8	40	2	11,0	9,6
01/08/2006	7	44	8	-	-
08/08/2006	-	100	10	17,0	6,7
16/08/2006	18	47	15	-	-
22/08/2006	-	67	15	13,0	9,0
29/08/2006	13	83	12	15,0	8,9
05/09/2006	19	107	68	-	12,6
12/09/2006	16	79	8	17,0	10,6
19/09/2006	-	82	29	15,0	13,3
27/09/2006	14	58	13	16,0	10,1
03/10/2006	25	73	15	20,0	9,6
11/10/2006	22	66	19	-	-
31/10/2006	39	72	16	6,0	5,6
06/11/2006	7	30	10	4,0	4,1
14/11/2006	10	32	4	-	5,5
21/11/2006	8	31	8	-	5,0
28/11/2006	3	30	4	-	3,4
05/12/2006	6	34	5	-	-
12/12/2006	8	38	9	5,0	3,6
19/12/2006	5	46	4	-	4,5

Tabla 112. Valores de concentración en la salida del HV3 en el año 2007

FECHA	DBOSALH3	DQOSALH3	SSTSALH3	NTSALH3	PTSALH3
03/01/2007	15	65	13	-	-
09/01/2007	17	52	11	-	7,1
16/01/2007	16	82	10	-	-
24/01/2007	10	68	4	-	6,5
30/01/2007	4	30	5	20,4	6,8
07/02/2007	6	50	2	3,0	4,7
13/02/2007	4	30	3	-	-
21/02/2007	7	30	2	-	-
27/02/2007	5	31	6	26,3	4,3
07/03/2007	-	30	9	35,2	5,2
13/03/2007	42	99	10	20,6	5,5
20/03/2007	13	57	9	6,9	-
27/03/2007	9	50	7	28,6	6,1
10/04/2007	16	81	17	23,4	4,9
17/04/2007	8	61	6	30,3	-
24/04/2007	-	80	19	28,0	7,8
08/05/2007	46	84	39	-	-
15/05/2007	20	64	33	29,0	8,1
22/05/2007	20	91	22	20,9	8,8
29/05/2007	18	105	24	27,4	9,1
05/06/2007	60	124	25	25,0	10,2
12/06/2007	45	188	32	-	-
20/06/2007	6	67	16	38,1	10,9
26/06/2007	22	93	30	-	-
03/07/2007	21	72	12	27,3	11,0
17/07/2007	15	78	20	22,6	9,2
24/07/2007	9	80	6	25,4	8,3
01/08/2007	12	49	9	-	-
07/08/2007	10	86	8	-	-
21/08/2007	19	66	7	19,6	11,9
28/08/2007	6	73	5	22,6	10,3
04/09/2007	12	59	11	16,4	6,7
11/09/2007	10	59	11	-	-
18/09/2007	-	71	9	24,6	11,3
25/09/2007	27	81	20	-	-
02/10/2007	11	69	20	21,7	12,5
09/10/2007	-	-	-	31,5	13,6
16/10/2007	35	102	32	-	-
23/10/2007	25	94	31	23,4	10,8
30/10/2007	25	145	39	-	-
06/11/2007	30	97	52	39,3	11,5
27/11/2007	24	63	27	34,9	9,4
04/12/2007		92	28		
11/12/2007	4	75	20	32,2	9,6

Tabla 113. Valores de concentración en la salida del HV3 en el año 2008

FECHA	DBOSALH3	DQOSALH3	SSTSALH3	NTSALH3	PTSALH3
16/01/2008	26	75	21	-	-
22/01/2008	-	139	28	41,7	15,8
29/01/2008	60	182	36	-	-
05/02/2008	18	86	9	29,1	10,9
12/02/2008	-	126	55	-	-
26/02/2008	12	58	9	-	-
04/03/2008	15	82	36	29,5	10,4
11/03/2008	24	128	32	-	-
25/03/2008	20	96	30	28,3	10,1
01/04/2008	40	143	142	-	-
15/04/2008	5	42	8	29,1	3,4
22/04/2008	8	44	7	-	-
29/04/2008	16	39	11	22,3	5,0
06/05/2008	21	65	17	-	-
13/05/2008	17	58	24	24,3	6,0
20/05/2008	25	94	58	-	-
27/05/2008	26	83	17	25,5	6,8
03/06/2008	22	71	16	-	-
10/06/2008	22	74	10	22,3	9,0
17/06/2008	32	97	23	-	-
24/06/2008	-	102	18	24,4	9,9
01/07/2008	22	98	17	-	-
08/07/2008	32	82	40	24,8	9,8
17/07/2008	26	93	24	-	-
22/07/2008	24	85	23	30,0	9,0
30/07/2008	19	59	8	-	-
05/08/2008	35	117	30	32,5	9,0
19/08/2008	10	50	7	19,8	8,0
09/09/2008	65	178	94	-	-
16/09/2008	32	95	16	27,2	8,0
24/09/2008	30	125	24	-	-
30/09/2008	5	32	10	16,4	4,3
07/10/2008	36	107	46	-	-
16/10/2008	24	86	12	22,1	7,0
28/10/2008	45	125	78	31,4	8,2
04/11/2008	55	123	59	-	-
11/11/2008	65	212	192	-	10,6
25/11/2008	55	159	58	-	8,4
16/12/2008	-	141	51	-	8,5

Tabla 114. Valores de concentración en la salida del HV3 en el año 2009

FECHA	DBOSALH3	DQOSALH3	SSTSALH3	NTSALH3	PTSALH3
14/01/2009	-	120	20	-	-
20/01/2009	22	90	22	-	-
27/01/2009	14	71	10	-	-
25/02/2009	-	-	-	-	-
10/03/2009	13	54	9	-	-
17/03/2009	23	72	27	-	-
24/03/2009	-	68	27	-	-
31/03/2009	29	106	36	-	-
14/04/2009	19	86	12	-	-
21/04/2009	20	123	36	-	-
05/05/2009	0	148	77	-	-
19/05/2009	9	125	37	-	-
26/05/2009	16	81	14	-	-
02/06/2009	42	135	36	-	-
09/06/2009	45	134	34	-	-
16/06/2009	32	80	21	-	-
23/06/2009	21	77	13	-	-
22/07/2009	-	105	29	-	-

Tabla 115. Valores de concentración en la salida del HH5 en el año 2006

FECHA	DBOSALH5	DQOSALH5	SSTSALH5	NTSALH5	PTSALH5
07/06/2006	15	30	5	15,4	8,1
13/06/2006	33	76	8	21,1	10,7
28/06/2006	14	56	10	22,8	11,7
05/07/2006	16	90	10	-	-
11/07/2006	16	75	7	11,6	12,3
18/07/2006	19	70	7	-	-
26/07/2006	10	55	6	19,7	10,2
01/08/2006	12	75	5	-	-
08/08/2006	8	20	3	9,4	5,7
16/08/2006	7	20	4	10,3	5,9
22/08/2006	9	35	8	8,4	4,4
29/08/2006	4	20	9	10,2	5,0
05/09/2006	5	20	3	16,2	8,1
12/09/2006	6	55	6	21,4	11,4
19/09/2006	16	56	5	22,8	11,7
27/09/2006	11	35	3	-	-
03/10/2006	10	54	4	20,0	10,0
11/10/2006	22	64	25	-	-
31/10/2006	16	30	9	3,6	2,0
06/11/2006	4	30	2	2,0	1,2
14/11/2006	3	30	3	1,6	0,8
21/11/2006	2	30	3	2,6	1,8
28/11/2006	2	30	2	0,8	0,4
05/12/2006	2	30	7	-	-
12/12/2006	9	39	3	1,1	0,6
19/12/2006	1	34	3	2,1	1,1

Tabla 116. Valores de concentración en la salida del HH5 en el año 2007

FECHA	DBOSALH5	DQOSALH5	SSTSALH5	NTSALH5	PTSALH5
03/01/2007	5	41	6	-	-
09/01/2007	5	34	5	-	2,5
16/01/2007	-	-	-	-	-
24/01/2007	-	-	-	-	-
30/01/2007	3	30	6	25,5	1,6
07/02/2007	3	38	5	-	-
13/02/2007	3	30	5	-	-
21/02/2007	3	30	5	19,4	2,7
27/02/2007	2	30	5	26,7	2,6
07/03/2007	3	30	5	22,6	3,0
13/03/2007	4	37	5	6,1	
20/03/2007	5	41	10	10,0	4,6
27/03/2007	6	44	21	11,1	5,1
10/04/2007	9	42	41	13,1	8,1
17/04/2007	6	40	-	11,0	6,5
24/04/2007	8	62	8	-	-
08/05/2007	7	30	-	13,5	6,6
15/05/2007	7	42	-	11,0	9,7
22/05/2007	8	60	37	15,7	11,0
29/05/2007	7	72	37	12,0	9,8
05/06/2007	11	46	-	-	-
12/06/2007	20	194	29	11,2	11,9
20/06/2007	4	55	31	-	-
26/06/2007	6	52	30	12,6	8,7
03/07/2007	8	45	25	12,0	10,9
17/07/2007	5	49	22	13,3	14,3
24/07/2007	3	62	20	-	-
01/08/2007	6	97	25	-	-
07/08/2007	8	81	18	10,5	17,7
21/08/2007	5	30	13	8,4	11,3
28/08/2007	10	73	17	7,7	8,8
04/09/2007	12	45	18	-	-
11/09/2007	5	30	14	11,9	14,7
18/09/2007	13	55	13	-	-
25/09/2007	7	30	13	14,7	13,
02/10/2007	7	42	11	-	-
09/10/2007	13	55	11	10,5	14,2
16/10/2007	15	47	20	-	-
23/10/2007	16	70	14	16,8	15,9
30/10/2007	15	50	5	-	-
06/11/2007	9	0	5	21,0	12,0
27/11/2007	5	37	5	17,5	8,5
04/12/2007	4	51	8	-	-
11/12/2007	8	52	4	20,3	9,9

Tabla 117. Valores de concentración en la salida del HH5 en el año 2008

FECHA	DBOSALH5	DQOSALH5	SSTSALH5	NTSALH5	PTSALH5
16/01/2008	7	31	22	-	-
22/01/2008	9	56	20	-	-
29/01/2008	5	61	5	-	-
05/02/2008	-	-	-	-	-
12/02/2008	5	72	20	-	-
26/02/2008	3	37	5	-	-
04/03/2008	3	48	5	14,5	7,1
11/03/2008	3	52	5	-	-
25/03/2008	7	30	5	10,2	7,4
01/04/2008	4	33	5	-	-
15/04/2008	3	30	5	17,5	2,9
22/04/2008	3	56	5	-	-
29/04/2008	5	30	5	13,4	3,4
06/05/2008	8	47	10	-	-
13/05/2008	5	30	5	7,7	4,8
20/05/2008	3	33	5	-	-
27/05/2008	5	30	5	6,5	5,2
03/06/2008	5	30	5	-	-
10/06/2008	14	77	8	16,4	10,8
17/06/2008	11	56	12	-	-
24/06/2008	11	69	45	16,1	8,9
01/07/2008	9	56	18	-	-
08/07/2008	8	47	28	12,6	10,7
17/07/2008	20	63	27	-	-
22/07/2008	12	40	23	12,2	10,0
30/07/2008	15	33	19	-	-
05/08/2008	5	54	20	11,9	11,4
19/08/2008	3	30	22	18,2	12,6
09/09/2008	7	30	5	-	-
16/09/2008	18	102	55	13,3	16,5
24/09/2008	12	65	16	-	-
30/09/2008	4	33	12	16,2	4,0
07/10/2008	7	34	11	-	-
16/10/2008	3	30	12	10,5	6,4
28/10/2008	6	45	7	14,0	5,8
04/11/2008	6	44	6	-	-
11/11/2008	6	54	5	-	10,0
25/11/2008	7	58	5	-	10,1
16/12/2008	6	53	5	-	4,0

Tabla 118. Valores de concentración en la salida del HH5 en el año 2009

FECHA	DBOSALH5	DQOSALH5	SSTSALH5	NTSALH5	PTSALH5
14/01/2009	9	57	5	-	-
20/01/2009	8	54	5	-	-
27/01/2009	9	57	3	-	-
25/02/2009	6	29	6	-	-
10/03/2009	6	30	4	-	-
17/03/2009	23	75	36	-	-
24/03/2009	9	59	48	-	-
31/03/2009	9	57	45	-	-
14/04/2009	33	49	43	-	-
21/04/2009	9	29	25	-	-
05/05/2009	10	58	29	-	-
19/05/2009	18	101	9	-	-
26/05/2009	9	59	15	-	-
02/06/2009	9	44	9	-	-
09/06/2009	9	50	10	-	-
16/06/2009	15	56	9	-	-
23/06/2009	11	42	9	-	-
22/07/2009	9	55	-	-	-

Tabla 119. Valores de concentración en la salida del HH6 en el año 2006

FECHA	DBOSALH6	DQOSALH6	SSTSALH6	NTSALH6	PTSALH6
07/06/2006	24	45	2	-	-
13/06/2006	26	81	3	50,0	9,9
28/06/2006	28	72	3	51,0	10,1
05/07/2006	22	87	3	-	-
11/07/2006	38	94	8	57,0	10,3
18/07/2006	28	91	3	-	-
26/07/2006	16	61	3	44,4	8,7
01/08/2006	24	48	7	43,0	8,5
08/08/2006	20	79	3	45,5	6,3
16/08/2006	22	66	5	-	-
22/08/2006	-	70	15	37,0	9,2
29/08/2006	-	65	5	-	-
05/09/2006	16	63	13	-	8,8
12/09/2006	-	68	4	-	-
19/09/2006	23	78	7	42,0	9,1
27/09/2006	23	56	6	41,3	14,6
03/10/2006	30	56	5	38,0	10,8
11/10/2006	26	72	7	41,0	10,4
31/10/2006	-	31	2	20,0	4,5
06/11/2006	-	46	4	27,0	4,6
14/11/2006	18	58	6	-	4,2
21/11/2006	21	39	6	-	4,9
28/11/2006	18	31	3	-	4,4
05/12/2006	11	42	9	-	-
12/12/2006	50	30	2	-	3,3
19/12/2006	7	30	1	-	2,4

Tabla 120. Valores de concentración en la salida del HH6 en el año 2007

FECHA	DBOSALH6	DQOSALH6	SSTSALH6	NTSALH6	PTSALH6
03/01/2007	21	53	5	-	-
09/01/2007	42	75	5	-	8,6
16/01/2007	40	91	-	-	-
24/01/2007	58	95	19	-	9,1
30/01/2007	38	68	14	34,0	10,2
07/02/2007	30	50	6	29,0	6,4
13/02/2007	-	30	8	-	-
21/02/2007	23	55	8	-	-
27/02/2007	24	60	8	22,1	5,4
07/03/2007		70	3	18,0	4,5
13/03/2007	70	121	3	35,4	6,3
20/03/2007	28	74	3	-	-
27/03/2007	29	80	14	25,0	6,3
10/04/2007	15	101	8	26,0	10,2
17/04/2007	-	165	2	33,0	10,6
24/04/2007	-	158	6	36,0	9,0
08/05/2007	25	86	6	-	-
15/05/2007	50	106	6	29,0	8,1
22/05/2007	55	127	9	39,0	8,5
29/05/2007	60	133	11	41,0	8,9
05/06/2007	55	129	5	41,3	9,1
12/06/2007	25	98	9	-	-
20/06/2007	32	106	5	41,3	9,7
26/06/2007	23	69	12	-	-
03/07/2007	26	69	8	45,5	9,3
17/07/2007	10	77	10	44,0	8,4
24/07/2007	15	91	2	40,6	8,7
01/08/2007	16	81	3	-	-
07/08/2007	18	90	3	-	-
21/08/2007	18	66	3	39,2	11,1
28/08/2007	0	91	5	38,5	10,2
04/09/2007	16	59	5	28,7	8,0
11/09/2007	16	51	3	-	-
18/09/2007	15	47	5	33,6	10,5
25/09/2007	24	66	5	-	-
02/10/2007	18	91	5	40,6	10,2
09/10/2007	20	91	5	38,5	6,9
16/10/2007	22	44	5	-	-
23/10/2007	17	36	5	40,6	10,1
30/10/2007	18	-	4	-	-
06/11/2007	17	37	5	45,5	10,8
27/11/2007	28	51	5	35,0	9,4
04/12/2007	14	64	8	-	-
11/12/2007	15	58	22	44,8	10,1

Tabla 121. Valores de concentración en la salida del HH6 en el año 2008

FECHA	DBOSALH6	DQOSALH6	SSTSALH6	NTSALH6	PTSALH6
16/01/2008	18	56	5	-	-
22/01/2008	18	55	-	59,0	8,6
29/01/2008	20	82	5	-	-
05/02/2008	-	78	5	57,5	11,0
12/02/2008	9	75	6	-	-
26/02/2008	15	63	5	-	-
04/03/2008	3	70	5	55,3	7,7
11/03/2008	18	75	6	-	-
25/03/2008	22	96	5	43,4	5,4
01/04/2008	27	93	7	-	-
15/04/2008	7	50	6	28,7	2,4
22/04/2008	5	32	5	-	-
29/04/2008	8	30	5	9,2	2,3
06/05/2008	8	30	6	-	-
13/05/2008	3	37	5	10,5	6,6
20/05/2008	9	46	5	-	-
27/05/2008	6	35	6	12,6	1,4
03/06/2008	20	36	5	-	-
10/06/2008	14	47	5	17,5	8,9
17/06/2008	9	54	7	-	-
24/06/2008	19	87	5	24,5	5,2
01/07/2008	-	-	-	-	-
08/07/2008	7	42	5	26,6	5,8
17/07/2008	34	97	5	-	-
22/07/2008	16	57	5	35,0	3,4
30/07/2008	12	36	5	-	-
05/08/2008	6	40	5	39,2	4,3
19/08/2008	6	47	5	35,7	6,8
09/09/2008	5	43	5	-	-
16/09/2008	8	30	5	32,9	9,1
24/09/2008	10	33	5	-	-
30/09/2008	10	48	7	33,5	1,3
07/10/2008	8	30	9	-	-
16/10/2008	15	62	5	42,0	10,9
28/10/2008	8	37	5	28,7	9,7
04/11/2008	-	36	5	-	-
11/11/2008	6	53	5	-	10,2
25/11/2008	8	46	5	-	12,4
16/12/2008	8	69	5	-	8,1

Tabla 122. Valores de concentración en la salida del HH6 en el año 2009

FECHA	DBOSALH6	DQOSALH6	SSTSALH6	NTSALH6	PTSALH6
14/01/2009	6	29	5	-	-
20/01/2009	-	-	-	-	-
27/01/2009	-	-	-	-	-
25/02/2009	-	75	21	-	-
10/03/2009	10	46	4	-	-
17/03/2009	9	29	7	-	-
24/03/2009	38	115	24	-	-
31/03/2009	28	116	25	-	-
14/04/2009	69	170	33	-	-
21/04/2009	44	129	17	-	-
05/05/2009	27	130	0	-	-
19/05/2009	17	108	9	-	-
26/05/2009	18	85	9	-	-
02/06/2009	17	83	9	-	-
09/06/2009	26	91	9	-	-
16/06/2009	28	60	9	-	-
23/06/2009	21	65	9	-	-

Tabla 123. Valores de concentración en la salida del H4 en el año 2007

FECHA	DBOSALH4	DQOSALH4	SSTSALH4	NTSALH4	PTSALH4
03/01/2007	21	53	5	-	-
09/01/2007	42	75	5	-	7,6
16/01/2007	40	91	-	-	-
24/01/2007	58	95	19	-	7,6
30/01/2007	38	68	14	35,0	8,7
07/02/2007	30	50	6	33,3	7,4
13/02/2007	-	30	8	-	-
21/02/2007	23	55	8	-	-
27/02/2007	24	60	8	20,0	6,1
07/03/2007	-	70	3	16,2	5,4
13/03/2007	70	121	3	22,1	5,1
20/03/2007	28	74	3	-	-
27/03/2007	29	80	14	27,1	7,2
10/04/2007	15	101	8	27,8	5,4
17/04/2007	-	165	2	30,5	6,0
24/04/2007	-	158	6	17,2	7,0
08/05/2007	25	86	6	-	-
15/05/2007	50	106	6	20,4	7,5
22/05/2007	55	127	9	15,1	9,7
29/05/2007	60	133	11	18,0	10,5
05/06/2007	55	129	5	12,1	9,4
12/06/2007	25	98	9	-	-
20/06/2007	32	106	5	17,5	10,7
26/06/2007	23	69	12	-	-
03/07/2007	26	69	8	11,9	12,1
17/07/2007	10	77	10	13,0	10,5
24/07/2007	15	91	2	17,5	12,5
01/08/2007	16	81	3	-	-
07/08/2007	18	90	3	-	-
21/08/2007	18	66	3	16,8	12,6
28/08/2007	0	91	5	11,2	10,1
04/09/2007	16	59	5	8,4	7,3
11/09/2007	16	51	3	-	-
18/09/2007	15	47	5	14,0	9,7
25/09/2007	24	66	5	-	-
02/10/2007	18	91	5	14,7	11,7
09/10/2007	20	91	5	15,4	11,1
16/10/2007	22	44	5	-	-
23/10/2007	17	36	5	21,7	11,1
30/10/2007	18	0	4	-	-
06/11/2007	17	37	5	23,4	11,1
27/11/2007	28	51	5	22,1	9,6
04/12/2007	14	64	8	-	-
11/12/2007	15	58	22	22,4	10,6

Tabla 124. Valores de concentración en la salida del H4 en el año 2008

FECHA	DBOSALH4	DQOSALH4	SSTSALH4	NTSALH4	PTSALH4
16/01/2008	4	49	3	-	-
22/01/2008	12	61	8	29,8	10,7
29/01/2008	10	71	0	-	-
05/02/2008	9	42	0	30,0	11,1
12/02/2008	8	52	0	-	-
26/02/2008	-	42	0	-	-
04/03/2008	4	38	2	17,9	10,0
11/03/2008	4	64	0	-	-
25/03/2008	2	30	2	12,9	13,1
01/04/2008	-	40	0	-	-
15/04/2008	3	0	0	12,9	2,5
22/04/2008	4	71	0	-	-
29/04/2008	4	0	0	5,5	4,1
06/05/2008	7	0	0	-	-
13/05/2008	3	44	0	7,0	5,5
20/05/2008	4	37	0	-	-
27/05/2008	-	0	0	11,5	6,0
03/06/2008	7	43	0	-	-
10/06/2008	10	74	26	16,8	11,1
17/06/2008	6	55	0	-	-
24/06/2008	13	71	30	21,7	12,2
01/07/2008	10	59	0	-	-
08/07/2008	7	0	0	11,9	11,5
17/07/2008	12	57	0	-	-
22/07/2008	11	0	0	24,2	11,4
30/07/2008	8	45	2	-	-
05/08/2008	5	51	4	21,7	11,2
19/08/2008	3	43	2	22,7	9,8
09/09/2008	5	48	2	-	-
16/09/2008	3	46	1	20,3	8,4
24/09/2008	7	45	2	-	-
30/09/2008	3	0	0	10,3	-
07/10/2008	7	49	5	-	-
16/10/2008	-	-	-	13,3	6,9
28/10/2008	5	43	3	14,0	7,2
04/11/2008	3	30	3	-	-
11/11/2008	4	50	0	-	8,6
25/11/2008	6	94	5	-	8,4
16/12/2008	9	42	1	-	6,9

Tabla 125. Valores de concentración en la salida del H4 en el año 2009

FECHA	DBOSALH4	DQOSALH4	SSTSALH4	NTSALH4	PTSALH4
14/01/2009	-	35	6	-	-
20/01/2009	-	36	1	-	-
27/01/2009	-	43	2	-	-
25/02/2009	-	-	-	-	-
10/03/2009	27	71	56	-	-
17/03/2009	4	29	6	-	-
24/03/2009	9	71	28	-	-
31/03/2009	9	60	4	-	-
14/04/2009	9	65	9	-	-
21/04/2009	9	59	9	-	-
05/05/2009	11	77	0	-	-
19/05/2009	20	76	9	-	-
26/05/2009	9	63	9	-	-
02/06/2009	9	67	9	-	-
09/06/2009	9	65	9	-	-
16/06/2009	20	126	45	-	-
23/06/2009	9	85	9	-	-